

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ – 0,831

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ – 0,333

Журнал издается с 2001 г.

Электронная версия: <http://www.natural-sciences.ru>

Правила для авторов: <http://www.natural-sciences.ru/ru/rules/index>

Подписной индекс по электронному каталогу «Почта России» – П7816

Главный редактор

Ледванов Михаил Юрьевич, д.м.н., профессор

Зам. главного редактора

Курзанов Анатолий Николаевич, д.м.н., профессор

Ответственный секретарь редакции

Бизенкова Мария Николаевна, к.м.н.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д.с.-х.н., доцент Абдулвалеев Р.Р. (Уфа); д.г.-м.н., проф., Абилхасимов Х.Б. (Астатна); д.т.н., проф. Айдосов А. (Алматы); д.г.-м.н., проф., Алексеев С.В. (Иркутск); д.х.н., проф., Алоев В.З. (Нальчик); д.г.н., проф. Андреев С.С. (Ростов-на-Дону); д.г.н., доцент, Андреева Е.С. (Ростов-на-Дону); д.с.-х.н., доцент Анищенко Л.Н. (Брянск); д.с.-х.н., проф. Байрамбеков Ш.Б. (Камызяк); д.т.н., проф. Бейсембаев К.М. (Караганда); д.т.н., проф. Белозеров В.В. (Ростов-на-Дону); д.б.н., доцент Белоус О.Г. (Сочи); д.с.-х.н., проф. Берсон Г.З. (Великий Новгород); д.г.-м.н., проф. Бондарев В.И. (Екатеринбург); д.т.н., профессор Галкин А.Ф. (Ухта); д.г.-м.н., проф. Гавришин А.И. (Новочеркасск); д.с.-х.н., Горбачева А.Г. (Пятигорск); д.с.-х.н., Горянин О.И. (Самара); д.г.-м.н., проф. Гусев А.И. (Бийск); д.с.-х.н., проф. Данилин И.М. (Красноярск); д.б.н., доцент Долгов А.В. (Мурманск); д.э.н., проф. Долятовский В.А. (Ростов-на-Дону); д.х.н., проф. Дресвянников А.Ф. (Казань); д.г.н., проф. Егорова А.В. (Усть-Каменогорск); д.т.н., проф. Ерофеев В.И. (Томск); д.с.-х.н., проф. Залесов С.В. (Екатеринбург); д.с.-х.н., доцент Захарченко А.В. (Томск); д.с.-х.н., проф. Зволинский В.П. (Волгоград); д.х.н., проф. Ивашкевич А.Н. (Москва); д.б.н., доцент Кавцевич Н.Н. (Мурманск); д.т.н., проф. Калякин С.А. (Донецк); д.с.-х.н., проф. Караев М.К. (Махачкала); д.г.-м.н., проф. Кашаев А.А. (Иркутск); д.ф.-м.н., проф. Кобрунов А.И. (Ухта); д.г.-м.н., доцент Копылов И.С. (Пермь); д.г.-м.н., проф. Костицын В.И. (Пермь); д.с.-х.н., проф. Костылев П.И. (Зерноград); д.э.н., проф. Косякова И.В. (Самара); д.с.-х.н., Коцарева Н.В. (Белгород); д.т.н., доцент Кузьяков О.Н. (Тюмень); д.г.-м.н., проф. Кучеренко И.В. (Томск); д.б.н., проф. Ларионов М.В. (Саратов); д.г.-м.н., проф. Лебедев В.И. (Кызыл); д.ф.-м.н., проф. Лерер А.М. (Ростов-на-Дону); д.г.н., проф. Луговской А.М. (Москва); д.г.-м.н., проф. Мельников А.И. (Иркутск); д.т.н., проф. Мусаев В.К. (Москва); д.т.н., доцент Нехорошева А.В. (Ханты-Мансийск); д.с.-х.н., Никитин С.Н. (Ульяновск); д.с.-х.н., Оказова З.П. (Владикавказ); д.с.-х.н., проф. Партоев К. (Душанбе); д.с.-х.н., проф. Петелько А.И. (Мценск); д.т.н., проф. Петров М.Н. (Красноярск); д.т.н., проф. Пирумян Г.П. (Ереван); д.с.-х.н., проф. Проездов П.Н. (Саратов); д.г.-м.н., проф. Сакиев К.С. (Бишкек); д.б.н. Сибикеев С.Н. (Саратов); д.с.-х.н., доцент Сокольская О.Б. (Саратов); д.т.н., проф. Степанов В.В. (Санкт-Петербург); д.т.н., проф. Тарасенко А.А. (Тюмень); д.т.н. Теплухин В.К. (Октябрьский); д.э.н., проф. Титов В.А. (Москва); д.с.-х.н., проф. Титов В.Н. (Саратов); д.с.-х.н., проф. Тихановский А.Н. (Салехард); д.г.-м.н., проф. Трофименко С.В. (Нерюнгри); д.т.н., проф. Ульрих Е.В. (Кемерово); д.г.н., проф. Чодураев Т.М. (Бишкек); д.с.-х.н., проф. Шамшиев Б.Н. (Ош); д.т.н., проф. Шантарин В.Д. (Тюмень); д.т.н., проф. Шатов А.А. (Уфа); д.ф.-м.н., проф. Ширапов Д.Ш. (Улан-Удэ); д.т.н., проф. Шишелова Т.И. (Иркутск); д.ф.-м.н., проф. Шугунов Л.Ж. (Нальчик); д.г.-м.н., проф. Юргенсон Г.А. (Чита); д.г.н., проф. Яковенко Н.В. (Воронеж); д.т.н., проф. Ямалетдинова К.Ш. (Челябинск)

Журнал «УСПЕХИ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ» зарегистрирован
Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций.

Свидетельство – ПИ № ФС 77-63398.

Все публикации рецензируются. Доступ к электронной версии журнала бесплатный.

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ – 0,831.

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ – 0,333.

Журнал зарегистрирован в Centre International de l'ISSN. ISSN 1681-7494.

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ.

Учредитель, издательство и редакция:
ООО ИД «Академия Естествознания»

Почтовый адрес: 105037, г. Москва, а/я 47

Адрес редакции и издателя: 440026, Пензенская область, г. Пенза, ул. Лермонтова, 3

Ответственный секретарь редакции

Бизенкова Мария Николаевна

+7 (499) 705-72-30

E-mail: edition@rae.ru

Подписано в печать – 30.11.2022

Дата выхода номера – 30.12.2022

Формат 60x90 1/8

Типография

ООО «Научно-издательский центр

Академия Естествознания»,

410035, Саратовская область, г. Саратов, ул. Мамонтовой, 5

Техническая редакция и верстка

Доронкина Е.Н.

Корректор

Галенкина Е.С., Дудкина Н.А.

Способ печати – оперативный.

Распространение по свободной цене.

Усл. п.л. 18,75

Тираж – 1000 экз.

Заказ. УСЕ/11-2022

Подписной индекс П7816

© ООО ИД «Академия Естествознания»

СОДЕРЖАНИЕ

Сельскохозяйственные науки (4.1.1)

СТАТЬИ

ИНОКУЛЯЦИЯ РИЗОБАКТЕРИЯМИ ГОРЧИЦЫ БЕЛОЙ
НА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ С РАЗНОЙ
ОБЕСПЕЧЕННОСТЬЮ ГУМУСОМ

Лебедев В.Н., Воробейков Г.А., Ураев Г.А. 7

ПРОБЛЕМЫ РОБОТИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ ПОСАДОК
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР.
АКТУАЛЬНОСТЬ И КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

Хамуков Ю.Х., Канокова М.А. 13

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ
ПРИМЕНЕНИЯ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ
В СТЕПНОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ

Грошева О.А. 21

Географические науки (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)

СТАТЬИ

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ В УПРАВЛЕНИИ
ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ОБЪЕКТОВ
РАЗМЕЩЕНИЯ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ (ТКО)

Ашихмина Т.В. 28

ПОЛОВАЯ СТРУКТУРА ПОПУЛЯЦИИ КАВКАЗСКОГО БЛАГОРОДНОГО
ОЛЕНЯ (*CERVUS ELAPHUS MARAL OGILBY*, 1840)
НА ПОЛУОСТРОВЕ АБРАУ (СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ КАВКАЗ)

Быхалова О.Н., Кудактин А.Н. 35

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ И ГИС В ОЦЕНКЕ ЛЕСОЗАРАСТАНИЯ
НЕИСПОЛЪЗУЕМЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ

Габитова А.А., Галеев Э.И., Одинцов Г.Е., Тагиров В.В., Янбаев Ю.А. 42

ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭТНИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ КОРЕННЫХ
МАЛОЧИСЛЕННЫХ НАРОДОВ РОССИИ (НА ПРИМЕРЕ ЯКУТИИ)

Дегтева Ж.Ф. 47

БИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АГРОЛАНДШАФТОВ
РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Коханистая Н.В., Шишкина Д.Ю., Закруткин В.Е. 53

ОСОБЕННОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ МАРГИНАЛЬНОГО
ФИЛЬТРА В УСТЬЯХ РЕК С УСТОЙЧИВЫМ ГАЛОКЛИНОМ В ЗИМНИЙ
ПЕРИОД НА ПРИМЕРЕ ДЕЛЬТЫ СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ

Мискевич И.В., Котова Е.И., Нецветова О.П. 61

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ОБЪЕКТА ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ
ОТХОДОВ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Олива Т.В., Коновалова Ю.Б., Манохина Л.А., Андреева Н.В. 66

СРАВНЕНИЕ КОНЕЧНО-РАЗНОСТНЫХ СХЕМ ДЛЯ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ГЛЯЦИОЛОГИЧЕСКИХ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	
<i>Попов С.В., Боронина А.С., Немчинова А.В.</i>	73
ПРИМЕНЕНИЕ АГРОГИС ДЛЯ ОЦЕНКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ И РАЗРАБОТКИ АДАПТИВНО-ЛАНДШАФТНЫХ СИСТЕМ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ	
<i>Сучков Д.К.</i>	82
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ПРИБРЕЖНОЙ ТЕРРИТОРИИ ОЗЕРА ЭБЕЙТЫ	
<i>Филиппова Т.А., Юсова Ю.С.</i>	88
ОСОБЕННОСТИ ГРУППОВОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ОРГАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ТОРФА АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ	
<i>Чибисова В.Г.</i>	95
ПРИРОСТ БИОМАССЫ <i>CHLORELLA VULGARIS</i> ПРИ ЭКСПОЗИЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ КРАЙНЕВЫСОКИХ ЧАСТОТ	
<i>Щеглов Г.А., Маслобоев В.А.</i>	101

Геолого-минералогические науки (1.6.3, 1.6.5, 1.6.6, 1.6.10, 1.6.12, 1.6.17, 1.6.21)

СТАТЬИ

МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ ПОРОД ГОРЯЩИХ ТЕРРИКОНИКОВ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТОГО СОСТАВА ВОСТОЧНОГО ДОНБАССА	
<i>Артемов И.А., Попов Ю.В., Шарова Т.В.</i>	107
КАЧЕСТВО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА РЕГОЛИТА И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА УСЛОВИЯ ОСВОЕНИЯ ГОРНЫХ МАТЕРИКОВЫХ РАЙОНОВ ЛУНЫ	
<i>Гавришин А.И.</i>	113
НЕЛИНЕЙНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА ЧЕРЕЗ ОБРАЗЦЫ РАСКЛИНИВАЮЩЕГО МАТЕРИАЛА	
<i>Песков А.В.</i>	118

Технические науки (1.6.7, 1.6.9, 1.6.16, 2.8.1, 2.8.6, 2.8.7, 2.8.9)

СТАТЬИ

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ДОРОЖНОГО ПОЛОТНА	
<i>Галкин А.Ф., Железняк М.Н., Жирков А.Ф.</i>	124
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ ГЕОМАТЕРИАЛОВ В ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ КОНУСНОЙ МЕЛЬНИЦЕ	
<i>Осинов Д.А., Филиппов В.Е.</i>	130
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ШЛАКА В СИСТЕМЕ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ПТИЦЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА	
<i>Старостина И.В., Локтионова Е.В., Пороженюк Л.А., Лупандина Н.С., Кирюшина Н.Ю., Писклов М.А., Лушников А.С.</i>	136
СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ – ОСНОВА НОВОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЙ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН – СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КАРОТАЖА	
<i>Чердынцев С.Н.</i>	143

CONTENTS

Agricultural sciences (4.1.1)

ARTICLES

THE INOCULATION OF WHITE MUSTARD WITH RHIZOBACTERIA
ON SOD-PODZOLIC SOIL WITH DIFFERENT HUMUS CONTENT
Lebedev V.N., Vorobeykov G.A., Uraev G.A.7

PROBLEMS OF LANDING PROCESSING ROBOTIZATION CROPS.
RELEVANCE AND CONCEPTUAL LIMITATIONS.
Khamukov Yu.Kh., Kanokova M.A.13

REVIEW

POSITIVE AND NEGATIVE ASPECTS OF THE USE OF RESOURCE-SAVING
TECHNOLOGIES IN STEPPE AGRICULTURE
Grosheva O.A.21

Geographical sciences (1.6.8, 1.6.12, 1.6.13, 1.6.21)

ARTICLES

GEO-ENVIRONMENTAL MONITORING IN ENVIRONMENTAL
SAFETY MANAGEMENT SAFETY OF SOLID MUNICIPAL
WASTE DISPOSAL FACILITIES
Ashikhmina T.V.28

SEXUAL STRUCTURE OF THE CAUCASIAN RED DEER
(*CERVUS ELAPHUS MARAL* OGILBY, 1840) POPULATION
ON THE ABRAU PENINSULA (NORTHWEST CAUCASUS)
Bykhalova O.N., Kudaktin A.N.35

REMOTE SENSING AND GIS IN THE ASSESSMENT
OF REFORESTATION OF UNUSED AGRICULTURAL LANDS
Gabitova A.A., Galeev E.I., Odintsov G.E., Tagirov G.E., Yanbaev Yu.A.42

PROBLEMS OF DETERMINING THE ETHNIC TERRITORIES
OF INDIGENOUS PEOPLES OF RUSSIA (THE EXAMPLE OF YAKUTIA)
Degteva Z.F.47

BIOGEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF AGRICULTURAL LANDSCAPES
OF THE ROSTOV REGION
Kokhanistaya N.V., Shishkina D.Yu., Zakrutkin V.E.53

PECULIARITIES OF THE VERTICAL STRUCTURE OF A MARGINAL FILTER
IN THE MOUTH OF RIVERS WITH A STABLE HALOCLINE IN WINTER
ON THE EXAMPLE OF THE DELTA OF THE NORTHERN DVINA
Miskevich I.V., Kotova E.I., Netsvetaeva O.P.61

ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT OF THE MUNICIPAL SOLID WASTE
Oliva T.V., Konovalova Ya.B., Manokhina L.A., Andreeva N.V.66

COMPARISON OF FINITE DIFFERENCE SCHEMES FOR THEIR APPLICATION
IN THE FORMULATION OF MATHEMATICAL MODELS OF GLACIOLOGICAL
AND HYDROLOGICAL PROCESSES
Popov S.V., Boronina A.S., Nemchinova A.V.73

APPLICATION OF AGROGIS FOR AGRICULTURAL LAND ASSESSMENT AND DEVELOPMENT ADAPTIVE LANDSCAPE FARMING SYSTEMS	
<i>Suchkov D.K.</i>	82
PROMISING DIRECTIONS FOR THE DEVELOPMENT OF THE COASTAL TERRITORY OF LAKE EBEYTY	
<i>Filippova T.A., Yusova Yu.S.</i>	88
FEATURES OF THE GROUP CHEMICAL COMPOSITION OF THE ORGANIC PART OF PEAT IN THE ARKHANGELSK REGION	
<i>Chibisova V.G.</i>	95
<i>CHLORELLA VULGARIS</i> BIOMASS GROWTH DURING EXTREMELY HIGH FREQUENCY ELECTROMAGNETIC RADIATION EXPOSURE	
<i>Shcheglov G.A., Masloboev V.A.</i>	101

Geological and mineralogical sciences (1.6.3, 1.6.5, 1.6.6, 1.6.10, 1.6.12, 1.6.17, 1.6.21)

ARTICLES

MINERALOGICAL AND PETROGRAPHIC ZONING OF ROCKS OF BURNING SANDY-ARGILLACEOUS WASTE HEAPS OF THE EASTERN DONBASS	
<i>Artemov I.A., Popov Yu.V., Sharova T.V.</i>	107
THE QUALITY OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF REGOLITH AND ITS INFLUENCE ON THE CONDITIONS FOR THE DEVELOPMENT OF THE MOUNTAINOUS CONTINENTAL REGIONS OF THE MOON	
<i>Gavrishin A.I.</i>	113
NONLINEAR DEPENDENCES DURING GAS FILTRATION THROUGH SAMPLES OF WEDGING MATERIAL	
<i>Peskov A.V.</i>	118

Technical sciences (1.6.7, 1.6.9, 1.6.16, 2.8.1, 2.8.6, 2.8.7, 2.8.9)

ARTICLES

CALCULATION OF THE SURFACE TEMPERATURE OF THE ROADWAY	
<i>Galkin A.F., Zheleznyak M.N., Zhirkov A.F.</i>	124
CENTRIFUGAL DOUBLE STAGE CONE MILL	
<i>Osipov D.A., Filippov V.E.</i>	130
APPLICATION OF MODIFIED STEELMAKING SLAG IN POULTRY- PROCESSING INDUSTRIAL WASTEWATERS PURIFICATION SYSTEM	
<i>Starostina I.V., Loktionova E.V., Porozhnyuk L.A., Lupandina N.S., Kuryushina N.Yu., Pisklov M.A., Lushnikov A.S.</i>	136
THE SEISMOELECTRIC EFFECT IS THE BASIS OF A NEW GEOPHYSICAL METHOD OF OIL WELL RESEARCH – SEISMOELECTRIC LOGGING	
<i>Cherdyntsev S.N.</i>	143

СТАТЬИ

УДК 631.417.2:631.8:582.683.2

**ИНОКУЛЯЦИЯ РИЗОБАКТЕРИЯМИ ГОРЧИЦЫ БЕЛОЙ
НА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ
С РАЗНОЙ ОБЕСПЕЧЕННОСТЬЮ ГУМУСОМ**

¹Лебедев В.Н., ¹Воробейков Г.А., ²Ураев Г.А.

¹ФГБОУ ВО «Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена»,
Санкт-Петербург, e-mail: antares-80@yandex.ru;

²ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I», Санкт-Петербург, e-mail: uraev.ga@yandex.ru

В работе рассматриваются вегетационные опыты по изучению влияния предпосевной семенной инокуляции горчицы белой (*Sinapis alba* L.) сорта Чергинская (к-4219) ростостимулирующими ассоциативными ризобактериями (PGPR) (Мизорин, Флавобактерин и Вариоворакс). Одна часть опытных растений выращивалась в сосудах с почвой, отличающейся более высоким содержанием гумуса (2,4%), а вторая часть – на менее гумифицированной почве (1,5%). Обе почвы характеризовались достаточной биологической активностью дыхания почвенных микроорганизмов и их клетчаткоразрушающей способностью. В течение всего эксперимента учитывались всхожесть и основные ростовые процессы, которые определяют продуктивность зеленой массы горчицы белой в условиях Ленинградской области: высота растений, количество боковых побегов, длина междоузлий, сухая масса корней и надземных органов. Изучение морфоструктурных изменений растений и продуктивности надземных органов проводилось в фазу активного цветения, т.е. в период их укосной зрелости. В результате эксперимента было установлено, что бактериальные препараты Мизорин (*Arthrobacter mysorens*, штамм 7) и Флавобактерин (*Flavobacterium sp.* штамм 30) оказывают наибольшее стимулирующее влияние на все исследованные нами параметры. Результаты вегетационного опыта показали, что действие микроорганизмов на стимуляцию всхожести, ростовых процессов и продуктивности, при выращивании растений на почве с более высоким содержанием гумуса было более выраженным. Опытные варианты с применением данных штаммов на фоне почвы, имеющей в своем составе меньшее количество гумуса, были в среднем на 8% (1–30%) менее эффективны. Проведенная оценка эффекта показывает, что при инокуляции растений повышается как урожайность, так и уровень доходов сельскохозяйственных предприятий от сухой зеленой массы.

Ключевые слова: инокуляция, продуктивность, стимуляция роста, горчица белая, вегетационный опыт, ризобактерии, способствующие росту растений (PGPR), гумус, клетчаткоразрушающая активность, ассоциативные ризобактерии, экономический эффект

**THE INOCULATION OF WHITE MUSTARD
WITH RHIZOBACTERIA ON SOD-PODZOLIC SOIL
WITH DIFFERENT HUMUS CONTENT**

¹Lebedev V.N., ¹Vorobeykov G.A., ²Uraev G.A.

¹Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint Petersburg, e-mail: antares-80@yandex.ru;

²Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University, Saint Petersburg,
e-mail: uraev.ga@yandex.ru

In the article discusses vegetative experiments to study the effect of pre-sowing seed inoculation of white mustard (*Sinapis alba* L.) of the var. Cherginskaya (k-4219) with growth-stimulating associative rhizobacteria (PGPR) (Mizorin, Flavobacterin and Variovorax). One part of the experiment was grown in vessels with soil with a higher humus content (2,4%), and the second part on soil with lower humus content (1,5%). Both soils were characterized by sufficient biological activity of respiration of soil microorganisms and their fiber-destroying ability. During the whole experiment, germination and the main growth processes that determine the productivity of the green mass of white mustard in the conditions of the Leningrad region were taken into account: plant height, number of lateral shoots, length of internodes, dry mass of roots and aboveground organs. The study of morphological structure changes in plants and the productivity of aboveground organs was carried out during the phase of active flowering, i.e. during their oblique maturity. As a result of the experiment, it was found that the bacterial preparations Mizorin (*Arthrobacter mysorens*, strain 7) and Flavobacterin (*Flavobacterium sp.* strain 30) have the greatest stimulating effect on all the parameters studied by us. The results of the vegetation experiment showed that the action of microorganisms on the stimulation of germination, growth processes and productivity, when growing plants on soil with a higher humus content was more pronounced. Experimental variants using these strains against the background of soil containing a smaller amount of humus were on average 8% (1–30%) less effective. The conducted assessment of the effect shows that when plants are inoculated, both the yield and the level of income of agricultural enterprises from dry green mass increases.

Keywords: inoculation, productivity, growth stimulation, white mustard, pots experience, rhizobacteria promoting plant growth (PGPR), humus, fiber-destroying activity, associative rhizobacteria, economic effect

Активно распространяются в современном аграрном производстве биотехнологические методы, направленные на экологи- зацию получаемой сельскохозяйственной продукции. Особое внимание при этом уделяется использованию ростостимулирую-

щей группы ризобактерий (PGPR – от англ. plant growth-promoting rhizobacteria), ассоциативные штаммы которых способствуют повышению устойчивости и продуктивности культур даже в условиях влияния неблагоприятных факторов внешней среды [1, 2]. Однако [3, 4] использование данных микроорганизмов подразумевает не только их тщательный подбор к конкретному растению, но и учет определенных почвенно-климатических условий, в которых происходит взаимодействие в системе «бактерия – растение».

В настоящий момент имеются достаточно противоречивые сведения об эффективности ассоциативных взаимодействий ризобактерий и растений на почвах, отличающихся по агрохимическому составу питательных веществ [5]. Большинство исследователей [6, 7] указывают на то, что при повышении содержания общего азота в почве, внесении высоких доз минеральных удобрений происходит ингибирование взаимодействий между микроорганизмом и растением, но вместе с тем на высоко гумифицированных почвах эффективность данного ассоциативного комплекса оказывается выше, чем на более бедных [8].

Объектом нашего исследования служила горчица белая – перспективная для выращивания на зеленую массу в условиях северо-запада РФ малораспространенная культура [9]. Вегетативная масса этого растения практически не уступает редьке масличной, а условия Ленинградской области позволяют получать по два урожая надземных органов за один вегетационный период при весеннем (май) и летнем (июнь – начало июля) посевах.

Оценка эффективности инокуляции семян растений ассоциативными штаммами ризобактерий на дерново-подзолистой почве с различным содержанием гумуса представляла собой практическую цель нашего исследования.

Материалы и методы исследования

Работа проводилась в условиях вегетационного опыта с горчицей белой (*Sinapis alba* L.) сорта Чергинская (к-4219) по стандартной методике [10]. Исследование проводилось на территории агробиостанции РГПУ им. А.И. Герцена в пос. Вырица. Культура выращивалась в вегетационном домике в пластиковых сосудах на 5 кг почвы при естественных условиях освещения. В каждый сосуд помещалось по 20 семян, а после всходов их число выравнивалось до 10 шт. Повторность опыта четырехкратная.

В работе применялись биопрепараты, созданные и предоставленные лабораторией экологии симбиотических и ассоциативных ризобактерий ВНИИСХМ. Процесс инокуляции семян горчицы ризобактериальными препаратами проводился согласно рекомендациям [11] непосредственно перед их посевом. В опыте использовались штаммы, зарекомендовавшие себя как высокоэффективные для однолетних полевых капустных культур: Мизорин (*Arthrobacter mysorens*, штамм 7), Флавобактерин (*Flavobacterium sp.* штамм 30) и Вариоворакс (*Variovorax paradoxus*, штамм 5С-2). В контроле (без проведения инокуляции) семена поливались водой.

В опытах использовалась супесчаная дерново-слабоподзолистая почва с двух различных участков, где последние три года произрастала в качестве уравнительного посева овсяно-ячменная смесь. Химический и энзимологический анализы почвы проводили по общепринятым методикам [12, 13]: содержание гумуса определяли по методу И.В. Тюрина в модификации В.Н. Симакова; определение подвижных соединений фосфора и калия по А.Т. Кирсанову; гидrolитическую кислотность по Каппену; сумму поглощенных оснований по Каппену – Гильковицу; биологическую активность почвы по выделению CO_2 по методу Иванова – Коссович; клетчаткоразрушающую активность почвы определяли по интенсивности разложения льняного полотна методом Мишустина, Вострова и Петровой.

Почвы, на которых проводились вегетационные опыты, были близки друг другу по совокупности агрохимических показателей и более всего отличались по показателю валового гумуса (табл. 1). Средние показатели биологической активности почв составляли 18,5 мг CO_2 /г почвы в час в почве с более высоким содержанием гумуса (ВСГ) и 16,5 мг CO_2 /г почвы в час при его меньшем содержании (НСГ).

Согласно рекомендациям [14], для повышения эффективности микробно-растительного ассоциативного комплекса перед посевом семян и инокуляцией в почву каждого сосуда вносилось комплексное минеральное удобрение азофоска из расчета $\text{N}_{0,1}\text{P}_{0,1}\text{K}_{0,1}$ д.в. на каждый килограмм почвы. Опыт поддерживался регулярным поливом до 70% влажности от полной ее влагоемкости.

Всхожесть учитывалась на седьмой день посева.

Таблица 1

Агрохимическая характеристика дерново-слабоподзолистой супесчаной почвы, используемой в вегетационных опытах

Тип почвы	% гумуса	pH H ₂ O	pH KCl	Nг мг/экв на 100 г почвы	S мг/экв на 100 г почвы	V, %	P ₂ O ₅ мг/100г почвы	K ₂ O мг/100 г почвы
ВСГ*	2,4	6,5	5,7	5,0	9,8	44,9	11,3	6,9
НСГ**	1,5	6,2	5,6	5,2	10,4	55,6	11,0	6,7

Примечание. * – дерново-подзолистая почва с повышенным содержанием гумуса;
** – дерново-подзолистая почва с пониженным содержанием гумуса

Таблица 2

Влияние инокуляции семян ассоциативными ризобактериями на всхожесть (%) и высоту (см) растений горчицы белой

Вариант	ВСГ				НСГ			
	Всхожесть семян		Высота растений		Всхожесть семян		Высота растений	
	%	Δ%	см	%	%	Δ%	см	%
Контроль	70	–	50,1	100	70	–	24,0	100
Мизорин	82	+12	59,2	118	78	+8	27,2	113
Флавобактерин	76	+6	59,0	118	72	+2	26,5	110
Вариоворакс	74	+4	52,6	104	70	0	24,4	102
НСР _{0,05}	1,8	–	3,8	–	1,6	–	2,6	–

Учет морфометрических параметров, а также продуктивности надземных органов проводился на хозяйственной стадии укосной спелости для использования зеленой массы культуры – фазы активного цветения. В этот же период, после ликвидации опыта, проводился анализ воздушно-сухой массы корней растений, участвовавших в вегетационном опыте. Полученные экспериментальные результаты обрабатывались статистическим методом дисперсионного анализа с использованием табличного процессора Microsoft Excel.

По результатам продуктивности сухой зеленой массы осуществлялась оценка экономического эффекта, который проводился с помощью расчета относительного изменения дохода от реализации сухой зеленой массы горчицы к контролю, где не производилась инокуляция семян. В более ранних работах нами было подробно рассмотрен данный подход к проведению оценивания экономического эффекта в аграрном производстве [15]. Следует отметить, что в исследовании не оценивались такие экономические показатели, как срок окупаемости, чистая приведенная стоимость и др., так как технология инокуляции семян не предполагает приобретение дополнительного оборудования и техники.

Результаты исследования и их обсуждение

Вегетационный опыт выявил положительное действие предпосевной инокуляции семян ассоциативными ризобактериальными биопрепаратами уже на первых этапах органогенеза. Прорастание семян в опытных вариантах было выше, чем в контроле, где инокуляция не проводилась (табл. 2). На почве с более высоким содержанием гумуса максимальная всхожесть превышала контрольные данные (70%) на 12%, а с более низким – на 8%. При этом наиболее эффективным препаратом в обоих случаях оказался Мизорин.

Результаты анализа высоты растений в фазу их активного цветения свидетельствуют о стимулирующем влиянии отобранных микроорганизмов на ростовой процесс линейного роста горчицы. Предпосевная инокуляция семян Мизорином и Флавобактерином в условиях более гумифицированной почвы повышала высоту растений на 9,1 см (18%) и на 8,9 см (17%) относительно контроля (50,1 см) соответственно. Артробактерии, входящие в основу бактериального препарата Мизорин, также оказались самыми эффективными

в отношении стимуляции высоты растений на почве с меньшим содержанием гумуса – на 13 % (до 27,2 см), относительно варианта без проведения бактериализации семенного материала (24,0 см).

Стимуляция ростовых процессов у горчицы белой прослеживалась и на примере других показателей: числе боковых побегов и длине междоузлий (табл. 3). Известно [16], что боковые побеги оказывают большое влияние на продуктивность надземных органов горчицы, особенно в условиях водного стресса. В наших исследованиях бактериальная обработка семян Мизорином и Флавобактерином, выращенных на почве с более высоким значением гумуса, приводила к появлению от одного до двух дополнительных побегов по сравнению с контролем (11,0 шт./раст.). При этом на почве с более низким содержанием гумусовых веществ наиболее эффективной оказалась ризобактерия *Variovorax paradoxus*, штамм 5С-2, где отмечалось в среднем на один побег больше, чем у контрольной группы растений (9,0 шт./раст.).

В связи с тем, что формирование линейных показателей растений связано с изменением длины междоузлий, представляло

интерес оценить данный ростовой показатель в нашем опыте. Опытные варианты с использованием артробактерий (Мизорин) и флавобактерий (Флавобактерин) приводили к незначительному (на 5 %), но достоверному, относительно контроля, увеличению длины междоузлий у растений, выращенных на почве ВСГ. В опыте с почвой НСГ длина междоузлий у горчицы достоверно отличалась от контроля только в варианте с Мизорином (на 13 %).

Морфометрические изменения растений горчицы белой при инокуляции бактериальными препаратами на разном гумусном фоне нашли свое отражение и на формировании биомассы надземных органов (табл. 4). Согласно полученным нами результатам продуктивность сухой массы растений максимально увеличивалась в опытных вариантах (Мизорин и Флавобактерин), где ранее отмечался стимулирующий эффект ростовых процессов вне зависимости от количества гумуса в почве. Однако при его более высокой концентрации отмечались более высокие превышения (на 28–29%) в сравнении контролем, чем при его сравнительно низком почвенном содержании (на 20–22%).

Таблица 3

Действие ассоциативных ризобактерий на число боковых побегов (шт./раст.) и длину междоузлий растений (см)

Вариант	ВСГ				НСГ			
	Число боковых побегов		Длина междоузлий		Число боковых побегов		Длина междоузлий	
	шт./раст.	%	см	%	шт./раст.	%	см	%
Контроль	11,0	100	6,0	100	9,0	100	3,0	100
Мизорин	12,0	109	6,7	105	9,7	108	3,4	113
Флавобактерин	13,0	118	6,7	105	9,6	107	3,2	107
Вариоворакс	11,2	102	6,4	100	10,0	111	3,2	107
НСР _{0,05}	0,8	–	0,4	–	0,6	–	0,3	–

Таблица 4

Продуктивность надземной массы (г/сосуд) и воздушно-сухая масса корней (г/сосуд) растений при обработке семян ассоциативными ризобактериями

Вариант	ВСГ				НСГ			
	Сухая зеленая масса растений		Масса корней растений		Сухая зеленая масса растений		Масса корней растений	
	г/сосуд	%	г/сосуд	%	г/сосуд	%	г/сосуд	%
Контроль	48,5	100	4,40	100	38,8	100	3,10	100
Мизорин	62,3	128	4,52	130	46,7	120	3,12	120
Флавобактерин	63,0	129	4,64	160	47,5	122	3,13	130
Вариоворакс	64,0	124	4,40	100	44,0	113	3,13	130
НСР _{0,05}	1,8	–	0,11	–	1,6	–	0,1	–

Таблица 5

Клетчаткоразрушающая активность почв, использованных в различных вариантах опыта

Вариант	ВСГ			НСГ		
	НМ*	КМ**	СР***	НМ	ИМ	СР
	г	г	%	г	г	%
Контроль	1,2	0,5	59	1,2	0,05	96
Мизорин		0,6	50		0,2	83
Флавобактерин		0,8	33		0,1	92
Вариоворакс		0,6	50		0,1	92
НСР _{0,05}	–	0,1	–	–	0,1	–

Примечание. НМ* – начальная масса льняной полоски (г); КМ** – конечная масса льняной полоски (г); СР*** – степень разложения (%).

Кроме того, нами были отмечены изменения воздушно-сухой массы корней растений, задействованных в вегетационном опыте. Показано, что инокуляция биопрепаратами оказывала также стимулирующее влияние на формирование корневой системы горчицы. Наиболее существенное накопление сухого вещества в подземных органах наблюдалось при бактеризации семян Флавобактерином, независимо от агрохимических характеристик использованной в эксперименте почвы. Более выражено это было при выращивании на ВСГ почве (на 60%), чем в условиях НСГ (на 30%), относительно контроля.

Для оценки интенсивности почвенно-биологических процессов нами в работе использовались показатели ферментативной активности (табл. 5). Степень разложения клетчатки в почве зависит от наличия в ней легкодоступного азота, фосфора и других элементов, поэтому принято считать, что это отражает эффективную активность микробиологических процессов в целом.

Обе почвы характеризовались относительно высокой степенью разложения клетчатки. Наибольшая целлюлозоразрушающая активность (83–96%) была отмечена у почвы с наименьшей концентрацией гумуса, что связано с активностью олиготрофной почвенной микрофлоры.

Оценка экономического эффекта сельскохозяйственного предприятия приведена в табл. 6.

Доходы сельскохозяйственных предприятий от реализации сухой зеленой массы горчицы белой на почвах с высоким и низким содержанием гумуса увеличиваются от 113,40% до 131,96%.

Таблица 6

Доход от реализации сухой зеленой массы горчицы белой при обработке семян ассоциативными ризобактериями, в % от контроля

Вариант	ВСГ	НСГ
Мизорин	128,45	120,36
Флавобактерин	129,90	122,42
Вариоворакс	131,96	113,40

Согласно полученным результатам относительный доход от реализации сухой массы растений максимально увеличивался на почвах с высоким содержанием гумуса в опытных вариантах с Мизорином и Вариовораксом, а на почвах с его более низким содержанием – Мизрином и Флавобактерином.

Заключение

Таким образом, инокуляция семян горчицы белой (*Sinapis alba* L.) сорта Чергинская (к-4219) ассоциативными ризобактериальными штаммами на почвенном фоне разного содержания гумуса выявила эффективность применения биопрепаратов Мизорином (*Arthrobacter mysorens*, штамм 7) и Флавобактерином (*Flavobacterium sp.* штамм 30). Во всех исследованных нами параметрах у данных опытных вариантов наблюдались наиболее значительные прибавки по сравнению с контрольными данными. При этом проявление действия микроорганизмов на стимуляцию всхожести, ростовых процессов и продуктивности, при выращивании растений на почве с более высоким содержанием гумуса (2,4%) было

более выраженным. Так, всхожесть увеличивалась на 12%, высота боковых побегов – на 18%, длина междоузлий – на 5%, сухая масса корней – на 29% и надземных органов – на 60%. Опытные варианты с применением данных штаммов на фоне почвы, содержащей 1,5% гумуса, были в среднем на 8% (1–30%) менее эффективны.

Кроме того, проведенная оценка экономического эффекта от реализации сухой зеленой массы горчицы белой, семена которой были инокулированы ассоциативными ризобактериальными штаммами, показывает возможность увеличения уровня доходов сельскохозяйственных предприятий. Однако следует отметить влияние содержания почвенного гумуса на уровень экономического дохода от реализации сухой массы растений, прошедших бактериализацию.

Список литературы

1. Артамонова М.Н., Потатуркина-Нестерова Н.И., Беззубенкова О.Е. Роль бактериальных симбионтов в растительно-микробных ассоциациях // Вестник Башкирского университета. 2014. № 1 (19). С. 81–84.
2. Лебедев В.Н., Воробейков Г.А., Ураев Г.А. Повышение продуктивности растений семейства капустных (*Brassicaceae* Burnett.) при инокуляции семян бактериальными препаратами на основе ассоциативных штаммов // Успехи современного естествознания. 2017. № 5. С. 41–45.
3. Bhattacharyya P.N., Jha D.K. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2012. Vol. 28. P. 1327–1350.
4. Лебедев В.Н. Ассоциативные штаммы бактерий как современный элемент экологизации выращивания капустных растений // Известия РГПУ им. А.И. Герцена. 2014. № 168. С. 49–53.
5. Тихонович И.А., Завалин А.А. Перспективы использования азотфиксирующих и фитостимулирующих микроорганизмов для повышения эффективности агропромышленного комплекса и улучшения агроэкологической ситуации РФ // Плодородие. 2016. № 5. С. 28–32.
6. Fatih C., Murat E., Mehmet S., Arzu C. The Role of Beneficial Microorganisms in the Protection of Plants Growing in Natural Landscape Areas. *Siirt*. 2017. P. 427–442.
7. Миннебаев Л.Ф., Рафикова Г.Ф., Четвериков С.П., Чанышев И.О., Логинов О.Н. Влияние азотфиксации несимбиотическими бактериями на содержание азота в грунте без растений // Агрохимия. 2018. № 9. С. 63–68.
8. Алферов А.А., Завалин А.А., Кожемяков А.П., Чернова Л.С. Влияние удобрения и ризогаина на урожайность и качество зерна яровой пшеницы, потоки азота в системе удобрение – почва – растение // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 33. № 9. С. 10–15.
9. Велкова Н.И., Наумкин В.П. Факторы, влияющие на урожайность горчицы белой // Вестник научных конференций. 2016. № 11–5 (15). С. 48–50.
10. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. 6-е изд. М.: Альянс, 2011. 350 с.
11. Круглов Ю.В. Микробное сообщество почвы: физиологическое разнообразие и методы исследования // Сельскохозяйственная биология. 2016. № 1. С. 46–59.
12. Хазиев Ф.Х. Экологические связи ферментативной активности почв // Экобиотех. 2018. Т. 1. № 2. С. 80–92.
13. Мудрых Н.М., Пинаева М.И. Агрохимия: лабораторный практикум. Пермь: ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ им. акад. Д.Н. Прянишникова, 2020. 77 с.
14. Гамзаева Р.С. Количественная и качественная оценка биологической активности дерново-подзолистой почвы при применении бактериальных препаратов // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2020. № 58. С. 103–109.
15. Лебедев В.Н., Ураев Г.А. Оценка эффективности инокуляции семян четырех видов горчиц ассоциативными азотфиксирующими штаммами ризобактерий // Фундаментальные исследования. 2015. № 2–25. С. 5594–5598.
16. Лебедев В.Н., Воробейков Г.А. Продуктивность растений семейства *Brassicaceae* при инокуляции семян бактериальными препаратами // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. Петрозаводск, 2017. № 12. С. 80–86.

УДК 630*231.331:631.158:007.52

**ПРОБЛЕМЫ РОБОТИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ ПОСАДОК
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР.
АКТУАЛЬНОСТЬ И КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ**

Хамуков Ю.Х., Канокова М.А.

*ФГБУН Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр
Российской академии наук», Нальчик, e-mail: yukhab47@gmail.com, kanokova.madina@yandex.ru*

Одной из важнейших составляющих роботизации жизнедеятельности человека и общества в целом является, наряду с цифровизацией жизнедеятельности, обеспечение глобальных перемещений рабочих органов или, иными словами, обеспечение мобильности роботов. Таким образом, начавшийся переход цивилизации в эпоху тотальной роботизации связан с разработкой высокоподвижных и полностью управляемых транспортных платформ для мобильной робототехники различного назначения. Значительную долю таких изделий составят транспортные платформы для перемещения сельскохозяйственной робототехники, выполняющей производственные операции в особо сложных условиях – с передвижениями по рыхлым грунтам с высокой липкостью и жесткими ограничениями в маневрировании. В работе представлены результаты исследования возможностей и перспектив роботизации междурядной обработки посадок пропашных культур. Актуальность работы обусловлена тем, что экологические проблемы и ускоряющиеся процессы деградации сельскохозяйственных угодий требуют внедрения новых агротехнических приемов и технологий обработки посадок сельскохозяйственных культур. Негативное воздействие на сельхозугодья в наибольших масштабах возникает в виде машинной деградации, ухудшения химических и структурных характеристик и биологической активности почв от многочисленных проходов тяжелой техники, регулярного применения синтетических удобрений и пестицидов. В то же время именно обработка междурядий вносит основной вклад в деградацию угодий вследствие ее многократности и применения все более мощной техники. Снижать количество обработки междурядий не позволяют ограничения применения пестицидов и непрерывный рост приспособленности сельхозвредителей различного вида и сорной растительности к способам борьбы с ними. Повысить качество обработки междурядий без многочисленных проходов техники может роботизация производственных операций. При этом смысл понятия «роботизация» не вполне определен, а долговременные последствия широкомасштабной роботизации растениеводства не исследованы с позиций воздействия роботизации на экосистемный биогеоценоз.

Ключевые слова: растениеводство, агротехника, междурядная обработка, транспортная платформа, подвижность, роботизация, энергоэффективность, избирательное воздействие

**PROBLEMS OF LANDING PROCESSING ROBOTIZATION CROPS.
RELEVANCE AND CONCEPTUAL LIMITATIONS.**

Khamukov Yu.Kh., Kanokova M.A.

*Federal Scientific Center “Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences”,
Nalchik, e-mail: yukhab47@gmail.com, kanokova.madina@yandex.ru*

One of the most important components of the robotization of human life and society as a whole is, along with the digitalization of life, ensuring global movements of working bodies, or, in other words, ensuring the mobility of robots. Thus, the beginning of the transition of civilization to the era of total robotization is associated with the development of highly mobile and fully controlled transport platforms for mobile robotics for various purposes. A significant proportion of such products will be transport platforms for moving agricultural robotics that perform production operations in particularly difficult conditions – with movements on loose soils with high stickiness and severe restrictions on maneuvering. The paper presents the results of a study of the possibilities and prospects of robotization of inter-row cultivation of tilled crops. The relevance of the work is due to the fact that environmental problems and the accelerating processes of degradation of agricultural land require the introduction of new agricultural practices and technologies for processing crops. The negative impact on agricultural land on the largest scale occurs in the form of machine degradation, deterioration of the chemical and structural characteristics and biological activity of soils from numerous passages of heavy equipment, regular use of synthetic fertilizers and pesticides. At the same time, it is the cultivation of row spacing that makes the main contribution to the degradation of lands due to its repetition and the use of more and more powerful equipment. Limiting the use of pesticides and the continuous growth of the adaptability of agricultural pests of various types and weeds to methods of dealing with them do not allow reducing the amount of processing between rows. Robotization of production operations can improve the quality of row-spacing without numerous passes of equipment. At the same time, the meaning of the concept of “robotics” is not fully defined, and the long-term consequences of large-scale robotization of crop production have not been studied from the standpoint of the impact of robotization on ecosystem biogeocenosis.

Keywords: crop production, agricultural technology, inter-row cultivation, transport platform, mobility, robotization, energy efficiency, selective impact

В настоящее время относительно обоснованные надежды на сохранение плодородия сельхозугодий связаны с переходом к бесхимическим и не разрушающим струк-

туру почвы агротехнологиям в растениеводстве. Но переход на такие технологии сопряжен с необходимостью выполнениякратно большего количества двигательных

действий воздействующих на почву и растения рабочих органов и таким же значительным ростом требований к кинематическим и динамическим характеристикам этих действий. В настоящее время эти задачи решаются за счет усложнения и удорожания техники для обработки посадок традиционными рабочими органами. По мере усложнения применяемых в сельскохозяйственной отрасли технических средств и систем все острее проявляются ограничения в способности человека к управлению энергонасыщенными машинно-тракторными агрегатами с большими захватами и на высоких скоростях движения.

Следующим этапом механизации выполнения кинематически и динамически сложных двигательных действий по обработке почвы и растений в междурядьях является роботизация производственных операций в виде перехода на безлюдную технологию. Для достижения необходимого кратного снижения количества проходов техники по междурядьям роботизация должна обеспечивать соответствующее кратное повышение качества обработки почвы и растений.

Для этого роботизированный агрегат для междурядной обработки посадок должен обладать, во-первых, способностью безошибочного распознавания культурных растений и их вегетативных элементов. Во-вторых, способностью определять признаки поражения культурных и сорных растений болезнями. В-третьих, распознавать признаки наличия в посадках насекомых-вредителей и определять их количество. В-четвертых, определять вид сорных растений для выбора способа их удаления из междурядья. Затем следует способность управления усложнившимися кинематическими и динамическими действиями с рабочими органами для воздействия на почву и растения.

В данной работе оцениваются перспективы роботизации производства растениеводческой продукции в части возделывания пропашных культур. Наш подход основан на разделении задачи роботизации производственных процессов в растениеводстве на решение задачи алгоритмизации действий агротехнического робототехнического устройства, и на решение кинематических и динамических задач осуществления взаимодействия робототехнического устройства с почвой и растениями. Конкретно рассмотрены физико-технические ограничения на эксплуатационные харак-

теристики автономной мобильной агротехнической робототехники для междурядной обработки посадок.

Ограничительные характеристики робототехнического агрегата

Прежде всего, отметим, что в настоящее время определение «робот для междурядной обработки посадок» наиболее часто подразумевает, в сущности, традиционный агрегат для сплошной обработки посадок культиваторами и/или пестицидами, установленный в виде навесного оборудования на несущую транспортную платформу с автопилотом вместо механизатора. Подобный агрегат в лучшем случае является таким же тяжелым, как и обычные культиваторы на пилотируемой механизатором платформе. Соответственно, он вызывает такую же, а зачастую еще большую машинную деградацию почвы. Для существенного уменьшения деградации почвы необходимо использовать новые технологии и рабочие органы, основанные на иных физических принципах воздействия на почву и растения и позволяющие существенно (множественно!) снизить массу агрегатов. Особенно новые технологии обработки востребованы при возделывании пропашных культур, сопровождающемся наиболее интенсивными эрозийными процессами из-за многочисленности проходов агрегатов по полю. Также новые технологии должны быть малоэнерго- и малоресурсоемкими для достижения ощутимого экономического эффекта применения новой достаточно дорогостоящей роботизированной техники.

Наглядные ориентиры в оценке энергоемкости производственных операций представлены в таблице из «Методических указаний» курса лекций «Механизация производственных процессов в растениеводстве и их оптимальное проектирование» [1].

Таблица составлена по результатам практических полевых работ и позволяет сопоставлять сведения о трудо- и энергозатратах на выполнение отдельных операций и объективно отражает трудоемкость различных этапов возделывания подсолнечника. Из таблицы удалены столбцы с указанием длительности выполнения этапов возделывания с нормативными сроками и почасовым расчетом выполнения при различных продолжительностях рабочего дня и количества смен. Оставлены только столбцы со сведениями, необходимыми нам для общих оценок трудоемкости операций и этапов.

Виды работ и нормативы расходов топлива при возделывании подсолнечника

Шифр работ	Наименование сельхозработ	Исходные требования	Продолжительность рабочего дня, ч	Количество смен за сутки	Состав агрегата	Количество обслуживающего персонала, чел.	Норма выработки агрегата за 7 ч, га/т	Норма расхода топлива, кг/га, кг/т
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Лушение стерни дисковое (га)	0,05–0,07 м	14	2	К-3180-Catros	1	55	2,1
2	Лушение стерни лемешное (га)	0,14–0,16 м	21	3	К-3180+ППЛ-10-25	1	9,1	12,2
3	Транспортировка и внесение минеральных удобрений (т)	0,23 т/га	7	1	МТЗ-920+ЗА-М900	1	95	2,2
4	Погрузка органических удобрений (т)	20 т/га	10	1,4	К-3180+ПНУ-800	1	800	0,48
5	Внесение органических удобрений (т)	20 т/га	10	1,4	К-3180+МТУ-15	1	750	0,2
6	Вспашка на глубину 28–30 см	0,28–0,3 м	21	3	К-3180+RT-100	1	11,2	15,0
7	Разделка пласта пахоты (га)			25.09	К-3180-Catros	1	55	2,1
8	Сплошная культивация (га)	0,10–0,12 м		01.04	К-3180+КШУ-12	1	70	2,9
9	Сплошная культивация (га)	0,06–0,08 м		10.04	К-3180+КШУ-12	1	70	3,2
10	Сплошная культивация (га)	0,06–0,08 м		20.04	К-3180+КШУ-12	1	70	3,2
11	Посев подсолнечника (га)			20.04	К-3180+Kinze-3600	1+1	43,8	4,1
12	Прикатывание посевов (га)			21.04	К-3180+КЗК-10	1	2,3	2,3
13	Боронование до всходов (га)			26.04	К-3180+БЗШ-21+ШБ-2,5	1	1,5	1,5
14	Боронование после всходов (га)			10.05	К-3180+БЗШ-21+ШБ-2,5	1	1,5	1,5
15	Первая междурядная культивация (га)	0,08–0,10 м		15.05	К-3180+КРН-8,4	1	3,4	3,4
16	Вторая междурядная культивация (га)	0,08–0,10 м	250 га	25.05	К-3180+КРН-8,4	1	3,4	3,4
17	Третья междурядная культивация (га)	0,08–0,10 м		10.06	К-3180+КРН-8,4	1	32,6	3,4
18	Уборка подсолнечника (га)	2 т/га		20.09	TORUM-740	1	36,12	9,8
19	Транспортировка семян (т)	т		20.09	К-3180+НПБ-20	1	90 т	0,8
20	Транспортировка измельченных корзинок (т)	т/га		20.09	МТЗ-920+ПСЕ+-12,5	1	26	2,3
21	Скирдование измельченных корзинок (т)	т/га		20.9	МТЗ-920ПКУ-0,8	1	42,0	0,8

В частности, на подготовку пашни потребовались операции сплошной обработки почвы с общим расходом топлива 18,28 кг/га,

на предпосевную культивацию – 9,3 кг/га, на посев и послепосевную обработку – 9,4 кг/га, или более 390 МДж.

Далее последовали междурядные операции – на три междурядные культивации потребовалось топлива 10,2 кг/га, или почти 430 МДж. Соответственно, роботизированный агрегат сравнимой производительности – около 3 га за час работы – должен развивать мощность не более 0,36 МВт, чтобы его энергопотребление не превысило энергопотребление традиционного «пилотируемого» агрегата.

В первом приближении (принимая энергоэффективность самого культиватора за 100%), коэффициент полезного действия (КПД) культивации как тяговый КПД трактора можно рассчитать как [2–4]:

$$\eta_{\text{тяг}} = \eta_{\text{тр}} \times \eta_{\delta} \times \eta_{\text{т}}$$

где $\eta_{\text{тр}}$ – КПД с учетом механических потерь в трансмиссии; η_{δ} – КПД с учетом потерь на буксование ведущих колес; $\eta_{\text{т}}$ – КПД с учетом потерь на качение трактора.

Величина механического КПД $\eta_{\text{тр}}$ современных тракторных трансмиссий шестеренного типа при близких к расчетным величинам нагрузках равна 0,88–0,93.

КПД буксования η_{δ} учитывает потери мощности за счет снижения скорости из-за буксования двигателей трактора и при возможности пренебречь кинематическим несоответствием в работе двигателей определяется по формуле

$$\eta_{\delta} = v/v_{\text{т}} = 1 - \delta,$$

где $v/v_{\text{т}}$ – отношение реальной поступательной скорости двигателя к расчетной, δ – коэффициент буксования. Коэффициент буксования зависит от нагрузки на крюке трактора и от свойств почвы, но на практике ограничен допустимым значением, равным для гусеничных тракторов 0,05, а для колесных с двумя ведущими колесами – 0,18. Для полноприводных четырехколесных тракторов коэффициент буксования ограничен значением 0,15.

При работе в тяговом режиме на стерне колосовых для колесных тракторов $\eta_{\text{т}}$ принимают равным 0,88, а для гусеничных тракторов $\eta_{\text{т}} = 0,92$. Окончательно верхний предел значения КПД трактора в системе обрабатываемая почва – трактор примерно равен 0,69 [5].

С учетом КПД двигателей тракторов примерно 33%, получим результирующий КПД трактора с ДВС не более 23%.

Соответственно, робототехнический агрегат для междурядной обработки почвы и растений с такой же производительностью, как существующие традиционные

агрегаты, должен обладать способностью приложить к выполнению полезной работы мощность около 0,083 МВт.

Таким образом, если при выполнении этого ограничительного требования тяговый КПД транспортной платформы робототехнического агрегата будет выше 23%, роботизация междурядной обработки будет способствовать снижению ее энергоемкости. Отметим, что одной из наиболее трудоемких для возделывания культур является картофель. Затраты труда на производство 1 ц картофеля составляют примерно 3,5 чел.ч. Наиболее трудоемкими процессами являются подготовка семян к посадке и уборка. Также возделывание картофеля связано с многочисленными обработками плантаций из-за высокой чувствительности картофеля к недостатку любого микроэлемента, высокой поражаемости посадок картофеля различными инфекционными (грибными, бактериальными, вирусными, нематодными и др.) и неинфекционными болезнями и большого количества – более 60 видов насекомых, слизней, грызунов и т.п. вредителей.

Глобальные ограничивающие факторы

Для обоснования дальнейших выводов и предложений совершим небольшое отступление в область глобальных процессов эволюции агроэкосистем.

Мировой опыт развития производства сельскохозяйственной, в частности растениеводческой, продукции свидетельствует о том, что современное сельское хозяйство развивается в условиях обостряющегося противоречия между необходимостью выполнения многочисленных проходов тяжелой агротехники для ухода за посадками и применения пестицидов, с одной стороны, и неизбежной деградацией почвы и отравления ее пестицидами, с другой [6–8]. За последние двести-триста лет развитие производства растениеводческой продукции методом интенсификации производственных процессов средствами механизации традиционных приемов воздействия на почву и растения привело к возникновению глобальных угроз среде обитания человека. В качестве способа выхода из кризисной ситуации все с большей надеждой рассматривается роботизация производственных процессов. Но здесь человечество столкнулось с парадоксом. Суть его в том, что роботизация отрасли невозможна без того, чтобы роботизация приводила к осязаемой экономической эффективности. А экономическая

эффективность формируется из снижения себестоимости продукции и/или повышения ее качества. Вследствие этого роботизация воспринимается как осуществление банальной конъюнктурной политики в расчете на экономический эффект от замещения человека с его рабочими орудиями и приемами выполнения производственных операций на работа с теми же орудиями и приемами. Но опыт стран с передовой наукой и технологиями, предпринимающих попытки реализации национальных программ роботизации с подобными целями и задачами, свидетельствует о том, что она приводит к росту ресурсо- и энергопотребления и, естественно, не сопровождается возникновением экономического эффекта. Мы считаем, что это обусловлено не слабостью реализуемых в агротехнологиях инженерных решений, а в том, что традиционные приемы и средства выполнения производственных операций биоморфичны по своей природе и, следовательно, являются элементами диссипативных систем, экспортирующих энтропию в окружающую среду, то есть в экосистему. Соответственно, роботизация сельского хозяйства в ее современном виде с использованием традиционных орудий и воспроизводством традиционных способов взаимодействия с почвой и растениями не только не способна привести к экономическому эффекту в виде результирующего полезного результата, но и неизбежно ускорит деградацию экосистемы в целом. Обострившиеся экологические проблемы обусловили зависимость инвестиционной привлекательности роботизации от ее экономической эффективности и экологического следа в масштабах экосистемы. А поскольку агроэкосистемы являются частью экосистемы, с которой агроэкосистема непрерывно обменивается веществом и энергией и в которой система положительных и отрицательных обратных связей поддерживает динамическое равновесие в виде постоянства своих параметров и энтропии, то возникновение экономического эффекта, в свою очередь, оказалось связанным со снижением экологического давления агроэкосистемы на экосистему, или, точнее, экспорта энтропии агроэкосистемы в экосистему. То есть экономический эффект возникнет только с переходом на обратный по отношению ко всему живому принцип максимизации собственной энтропии агроэкосистемы при минимизации экспорта энтропии в экосистему. Условия энергетического баланса в экосистеме при

выполнении такого принципа обуславливают требование снижения энергозатрат на выполнение агротехнических действий с соответствующим снижением себестоимости продукции и одновременно с повышением видового разнообразия и количества трофических цепей агроценоза с соответствующим повышением качества продукции в биоморфологическом отношении.

Для этого следует в первую очередь исключить из производственных процессов человека и его биоморфичные технологии, и орудия производства с их энтропийной расточительностью и, во-вторых, перейти на применение новых, по всей видимости небноморфичных энтропийно консервативных способов и приемов воздействия на почву и растения. Соответственно, предпосылки развития экологически безопасных агротехнологий могут возникнуть только в виде результатов фундаментальных исследований процессов преобразования вещества и энергии, осуществляемых в агротехнологиях.

Перспективы перехода на альтернативное земледелие

В настоящее время попытки достижения энтропийно консервативного земледелия предпринимают сторонники концепции «альтернативного» земледелия [9, 10]. Суть этой концепции заключается в стремлении к полному отказу от синтетических удобрений, пестицидов, регуляторов роста и кормовых добавок и строгом соблюдении агротехники севооборотов с активным применением посадок бобовых культур, сохранением растительных остатков, использовании навоза, компостов и сидератов, механической культивации, биологических методов защиты растений. Соответственно, энтропия агроландшафта при таком земледелии будет выше, чем при активном применении гербицидов и прочих пестицидов и синтетических удобрений [11, 12]. Но отказ от применения пестицидов приводит к снижению урожайности культур. Помимо этого существенно растет количество агротехнических действий с помощью мощных агрегатов с соответствующим ускорением машинной деградации почв и экспорта энтропии. Таким образом, переход на траекторию оздоровления сельхозугодий за счет широкого внедрения альтернативного земледелия также требует создания и внедрения новых, энтропийно консервативных, агротехнологий. Вероятно, что это будут агротехнологии безлюдного возделывания

вания сельхозугодий на основе выполнения производственных операций автономными робототехническими системами. При этом, как было показано выше, эти операции не могут быть антропоморфичными, как в сложившихся к настоящему времени приемах альтернативного земледелия. Например, в качестве первого необходимого шага к созданию неантропоморфичной агротехнологии роботизированной междурядной обработки посадок пропашных культур следует оптимизировать выполняемые роботами в производственных операциях алгоритмические, кинематические и динамические действия.

*Алгоритмические, кинематические
и динамические аспекты
задачи роботизации*

Для алгоритмизации действий агротехнического робототехнического устройства необходимо, во-первых, детальное знание общих агротехнических требований к междурядной обработке пропашных культур. Во-вторых, знание ограничений на кинематические действия и на динамические характеристики робототехнических устройств.

К агротехническим требованиям к междурядной обработке посадок относятся:

1. Своевременность обработки в агротехнически обоснованные сроки их проведения. Допустимые отклонения от оптимальных сроков исчисляются в часах.

2. Соблюдение глубины обработки почвы с учетом назначения обработки, состояния растений, условий погоды. В том числе сообразно степени развития корневой системы растений следует применять различные рабочие органы, установленные на определенную глубину воздействия на почву, обеспечивающую сохранение увлажненности нижних слоев почвы и облегчающую доступ воздуха к корням растений при перувлажнении верхних слоев почвы. При этом среднестатистические отклонения глубины обработки почвы не должны отклоняться от установленной более чем на 15%.

3. Уничтожение всех сорняков в междурядье. Ясно, что это требование ограничено необходимостью поддержания видового разнообразия биома.

4. Соблюдение защитной зоны вокруг культурного растения для предупреждения повреждений его рабочими органами или заваливания почвой. Ограничения исчисляются в сантиметрах.

5. Соблюдение установленных с учетом фазы развития растений глубины заклад-

ки и расстояния от рядков растений или гнезд при внесении удобрений с точностью не хуже $\pm 8\%$.

Из этого перечня видно, что алгоритмы действий робототехнического агрегата будут определяться с учетом кинематических и динамических характеристик конструкции агрегата. В настоящее время на полях можно увидеть опытные образцы робототехники самых различных компоновочных и конструктивных решений, реализованных на различных транспортных платформах с различными энергетическими базами. Еще ни одна кинематическая схема не зарекомендовала себя как безусловно перспективная для широкого применения.

Отсутствие даже компоновочных схем устройства робототехнических агрегатов для междурядной обработки посадок не позволяет отталкиваться от их конструктивных особенностей и вынуждает учитывать только ограничения, обусловленные общефизическими законами. Ограничения в соответствии со сведениями из области сопротивления материалов в первом приближении мы также принимаем несущественными, поскольку успехи технологий создания композитных материалов и достижения металлургов в создании сплавов с различными свойствами предоставляют все больше возможностей для решения сложных инженерно-конструкторских задач за счет свойств новых материалов.

В конечном счете в качестве первого шага оценки перспектив роботизации междурядной обработки посадок рассмотрим особенности выполнения глобальных, региональных и локальных перемещений рабочих органов и эффекторов робототехнического устройства для осуществления безлюдной междурядной обработки посадок.

Поскольку локальные и региональные перемещения рабочих органов и эффекторов происходят относительно несущей транспортной платформы робототехнического устройства, задача управления ими сводится к решению обратной задачи кинематики с вычислением известными способами значений состояний кинематических пар манипуляторных органов для обеспечения движения эффектора к заданным сенсорной системой робототехнического устройства параметрам рабочего положения.

К настоящему времени разработано множество методов решения обратной задачи кинематики для многосвязных манипуляторов. Их перечень с подробным анализом особенностей представлен в [13].

Представленный в перечне метод обратных преобразований достаточно просто получает значения положений кинематических пар манипулятора, но не дает однозначных решений [14]. Метод штрафных функций, использующий приемы нелинейного программирования и свойства нейросетей, из-за медлительности не подходит для использования в режиме реального времени [15, 16].

Мощный метод бикватернионного решения кинематической задачи управления не всегда имеет решение [17]. Метод интервалов предназначен для управления манипуляторами с простыми кинематическими схемами [18].

Методы Sequential Monte Carlo Method (SMCM), Style-based Inverse Kinematics и Mesh-based Inverse Kinematics требуют предварительного обучения модели, из-за чего метод малопригоден для условий неструктурированной среды применения манипулятора [19]. Метод трех базовых функций разлагает алгоритмы рабочих движений манипулятора для широкого класса задач управления положением и ориентацией эффектора манипулятора средствами формализма операторов расширения векторной алгебры [20–22]. Близким к нему методом является метод ФАБРИК, использующий построение пересечений осевых линий звеньев постоянной длины, из-за чего принципиально не пригоден для решения обратной задачи кинематики для «дельта-манипуляторов» [23].

Наиболее универсальным и применимым является метод, изложенный в статье [24]. Суть метода в пошаговом моделировании движения отдельной части манипулятора, осуществляющей определенное движение манипулятора. Дробление углов поворота шарниров можно задавать. На каждом шаге решается прямая задача кинематики для отслеживания положения схвата и корректировки выполнения следующего шага. В отличие от ранее разработанных методов пошагового вычисления положений сочленений звеньев манипулятора, в этом методе используются доказанные в теоремах о конечных углах поворота и смещения максимальные значения шага для каждого сочленения. Это позволяет не решать прямую задачу кинематики для корректировки алгоритма. Пошаговое движение прекращается при достижении заданного положения и ориентации эффектора с необходимой точностью.

Сравнение приведенных методов решения обратной задачи управления рабо-

чими органами и эффекторами позволяет ориентироваться на принципиальную выполнимость разработок систем управления манипуляторами различного назначения. Но для этого предварительно следует задать условия обратной задачи управления манипулятором – указать параметры пространственного положения и ориентации рабочих органов/эффекторов манипуляторов. Для этого система управления робототехнической системы должна обладать способностью оперативно распознавать производственную ситуацию и формировать алгоритмическое описание миссии предстоящей производственной операции. Распознавание ситуации, в свою очередь, включает восстановление геометрического образа пространства междурядий, позиционирование элементов конструкции робота в этом пространстве и оценку выполнения указанного выше перечня агротехнических операций в междурядье. При этом оценки части этих операций могут быть сведены к измерениям значений определенных геометрических и/или физических параметров/факторов, а для других потребуются использование быстродействующего искусственного интеллекта.

Окончательно приходим к выводу о ключевом значении успехов в развитии систем искусственного интеллекта для роботизации междурядной обработки посадок.

Заключение

Существующие в настоящее время нейросетевые системы распознавания ситуаций в принципе применимы для обеспечения управления выполнением роботом агротехнических операций при обработке междурядий. Среди зарубежных разработчиков наибольших успехов добились компании CLAAS и John Deere, представившие ряд устройств для выполнения узкоспециализированных операций по обработке почвы на основе компьютерного зрения. Остальные разработчики пока на стадии запуска стартапов и R&D-проектов. В целом обзор лучших мировых разработок в области роботизации полеводства свидетельствует об отсутствии полноценных концепций решения задачи роботизации междурядной обработки посадок [25]. Мы объясняем это главным образом тем, что в разработках не преодолена традиция попыток использования в робототехнике антропоморфичных орудий.

Лидером по эффективности технологии автономной уборки урожая является авто-

пилот для уборочных комбайнов Cognitive Agro Pilot российской компании Cognitive Technologies. Опыт применения автопилота свидетельствует о том, что современный выполнимый и применимый на мобильной технике нейросетевой искусственный интеллект на пределе возможностей способен использовать для распознавания ситуации очень незначительное количество параметров ситуации. Cognitive Agro Pilot отслеживает кромку скошенной полосы поля, появление посторонних объектов в поле зрения камер и положение рулевого механизма шасси комбайна. Для распознавания производственной ситуации в междурядье нейросетевой искусственный интеллект должен будет в динамике отслеживать многократно большие количества параметров, вслед за распознаванием ситуации формировать производственные миссии и выработать управляющие команды для приводов рабочих органов робота. Указанное обстоятельство не позволяет в обозримом будущем рассчитывать на экономически оправданную роботизацию междурядной обработки посадок сельскохозяйственных культур.

Список литературы

1. Технологии, средства механизации и энергетическое оборудование в сельском, лесном и рыбном хозяйстве. Курс лекций для аспирантов по дисциплине «Эксплуатация машинно-тракторных агрегатов (МТА) в растениеводстве», 2016. 92 с.
2. Позин Б.М., Трояновская И.П. Тяговая характеристика трактора (основы теории и расчет). Челябинск: ЮУрГУ, 2016. 83 с.
3. Селиванов Н.И., Макеева Ю.Н. Адаптация колесных тракторов к технологиям почвообработки // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–1. URL: <https://science-education.ru/tu/article/view?id=19086> (дата обращения: 25.11.2022).
4. Капов С.Н., Орлянский А.В., Кожухов А.А., Бобрышов А.В., Лиханов В.А., Мирошникова В.В. Энергетическая оценка обработки почвы // Вестник аграрной науки Дона. 2018. № 3. С. 8–15.
5. Карабаницкий А.П., Левшукова О.А. Теоретическое обоснование параметров энергосберегающих машинно-тракторных агрегатов. Краснодар: КубГАУ, 2014. 104 с.
6. Абакумов Е.В. Теория эволюции и экология почв // Роль почв в биосфере и жизни человека: материалы докладов Международной научной конференции к 100-летию со дня рождения академика Г.В. Добровольского, к Международному году почв (Москва, 5–7 октября 2015 г.). М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2015. С. 13.
7. Здоровые почвы для здоровой планеты и здорового населения: ФАО призывает обратить вспять процесс деградации почв // Всемирный форум по продовольствию и сельскому хозяйству. Берлин, 2022. 3 с.
8. Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство). Национальный доклад. Т. 2. М.: ООО «Издательство МБА», 2019. 476 с.
9. Никлаев В.С., Косинский В.С., Ткачев В.В., Сучилина А.А. Основы технологии сельскохозяйственного производства // Земледелие и растениеводство. 2000. 557 с.
10. Когоякова В.В., Мамонтова С.А. Альтернативные системы земледелия // Проблемы современной аграрной науки: материалы международной научной конференции (Красноярск, 15 октября 2019 г.). Красноярск, 2019. С. 34–39.
11. Поздняков А.В., Шуркина К.А. Новый методологический подход к анализу функционирования агроэкосистем // Науки о Земле. 2008. С. 206–212.
12. Пляцук Л.Д., Черныш Е.Ю. Синергетика: нелинейные процессы в экологии: монография. Сумы: Сумский государственный университет, 2016. 229 с.
13. Данилов А.В., Кропотов А.Н., Трифонов О.В. Общий подход к решению обратной задачи кинематики для манипулятора последовательной структуры с помощью конечного поворота и смещения // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2018. № 81. 15 с. DOI: 10.20948/prepr-2018-81.
14. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами: учебник для вузов. М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2004. 480 с.
15. Дыда А.А., Оськин Д.А. Решение обратной задачи кинематики для манипуляционного робота методом штрафных функций // Фундаментальные исследования. 2015. № 11–4. С. 673–677.
16. Дыда А.А., Оськин Д.А., Константинова Е.А. Нейросетевое моделирование задачи обратной кинематики для манипуляционного робота // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 12 (2). С. 254–257.
17. Челноков Ю.Н., Нелаева Е.И. Бикватернионное решение кинематической задачи оптимальной нелинейной стабилизации произвольного программного движения свободного твердого тела // Известия Саратовского университета: Математика. Механика. Информатика. 2016. Т. 16. С. 198–207. DOI: 10.18500/1816-9791-2016-16-2-198-207.
18. Castellet A., Thomas F. Using interval methods for solving inverse kinematic problems. Proc. of the NATO Advanced Study Institute on Computational Methods in Mechanisms (NATOASI). Bulgaria. Vol. 2. 1997. P. 135–145.
19. Courty N., Arnaud E. Inverse Kinematics Using Sequential Monte Carlo Methods. Proc. of the 5th International Conference on Articulated Motion and Deformable Objects (AMDO2008). Spain. 2008. P. 1–10. DOI: 10.1007/978-3-540-70517-81.
20. Grochow K., Martin S.L., Hertzmann A., Popovic Z. Style-based inverse kinematics. ACM Transactions on Graphics (TOG). Proc. of ACM SIGGRAPH 2004. Vol. 23. P. 522–531. DOI: 10.1145/1015706.1015755.
21. Sumner R.W., Zwicker M., Gotsman C., Popovic J. Mesh-based inverse kinematics. ACM Transactions on Graphics (TOG). Proceedings of ACM SIGGRAPH 2005, 2005. Vol. 24. P. 488–495. DOI: 10.1145/1073204.1073218.
22. Беклемишев Н.Д., Платонов А.К., Соколов С.М., Трифонов О.В. Алгоритмы управления движением схвата манипулятора // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2017. № 47. 36 с. DOI: 10.20948/prepr-2017-47.
23. Aristidou A., Lasenby J. FABRIK: A fast, iterative solver for the Inverse Kinematics problem. Graphical Models. 2011. Vol. 73. P. 243–260. DOI: 0.1016/j.gmod.2011.05.003.
24. Каргинов Л.А. Иерархический подход к решению обратной задачи кинематики // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. № 03. С. 37–63.
25. Гольяпин В.Я. Сельское хозяйство 4.0. Тракторы. Роботы для полей: обзор интеллектуальной сельхозтехники // Агробизнес. 2019. [Электронный ресурс]. URL: <https://ag-bztech.ru/article/robots-for-fields-review-of-intelligent-agricultural-equipment/> (дата обращения: 25.11.2022).

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 631.5

**ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ
ПРИМЕНЕНИЯ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ
В СТЕПНОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ****Грошева О.А.***Институт степи Уральского отделения Российской академии наук – обособленное структурное
подразделение ОФИЦ УрО РАН, Оренбург, e-mail: Groshev06@yandex.ru*

В статье на основе анализа истории формирования и развития почвозащитных и ресурсосберегающих технологий на протяжении XIX-XXI веков, а также формирования современных зарубежных и отечественных научных центров апробации ресурсосберегающих технологий и систем земледелия выделены положительные и отрицательные стороны применения Mini-till и No-till в степном земледелии. Первые работы по разработке ресурсосберегающих агроприемов и технологий связаны с именами Стебута, Советова, Костычева, Тулайкова, Овсинского, Фолкнера. В дальнейшем мировой опыт обработки почвы обогатился созданием почвозащитной системы земледелия Мальцева и Бараева и No-till (Аллен). No-till, помимо США и Канады, получил широкое распространение в Аргентине, Бразилии, Парагвае, Чили, Австралии и Новой Зеландии, а признанными авторитетами применения No-till являются: Кроветто (Чили), Бартц, Перейра, Дайкстр, Каллегари (Бразилия), Мойер, Андерсон, Бибер (США). Представлены результаты исследований по влиянию минимальных обработок, прямого посева, No-till на накопление и сохранение влаги в почвах, сохранение водопроходной структуры черноземов, увеличение содержания органического вещества на опытных полях Донского ГАУ, Самарского НИИ сельского хозяйства, Уфимского научного центра, Северо-Кавказского федерального научного аграрного центра, Курского ФАНЦ и других исследователей. Среди положительных эффектов прямого посева и No-till можно выделить: влагобережение, защита от водной и ветровой эрозии, формирование водопроходных почвенных агрегатов, увеличение содержания гумуса, повышение биологической активности почв, экономия энергетических, трудовых и финансовых ресурсов, уменьшение эмиссии парниковых газов. Отрицательные стороны связаны с повышением фитотоксичности, увеличением плотности верхнего слоя почвы, дифференциацией пахотного слоя по плодородию, повышенной засоренностью посевов, поражаемостью растений болезнями и вредителями.

Ключевые слова: ресурсосберегающие технологии, степное земледелие, минимальная обработка почвы, прямой посев, No-till, мировой опыт

**POSITIVE AND NEGATIVE ASPECTS OF THE USE
OF RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES
IN STEPPE AGRICULTURE****Grosheva O.A.***Institute of Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences OFRC UB RAS,
Orenburg, e-mail: Groshev06@yandex.ru*

Based on the analysis of the history of the formation and development of soil-protective and resource-saving technologies during the 19th-21st centuries, as well as the formation of modern foreign and domestic scientific centers for approbation of resource-saving technologies and farming systems, the article highlights the positive and negative aspects of the use of Mini-till and No-till in the steppe agriculture. The first works on the development of resource-saving agricultural practices and technologies are associated with the names of Stebut, Sovetov, Kostychev, Tulaikov, Ovsinsky, Faulkner. In the future, the world experience in soil cultivation was enriched by the creation of a soil-protective system of agriculture by Maltsev and Baraev and No-till (Allen). No-till, in addition to the USA and Canada, has become widespread in Argentina, Brazil, Paraguay, Chile, Australia and New Zealand, and the recognized authorities for the use of No-till are: Crovetto (Chile), Bartz, Pereira, Dijkstr, Callegari (Brazil), Moyer, Anderson, Bieber (USA). The results of studies on the effect of minimal tillage, direct sowing, no-till on the accumulation and preservation of moisture in soils, the preservation of the water-resistant structure of chernozems, the increase in the content of organic matter in the experimental fields of the Don State Agrarian University, the Samara Research Institute of Agriculture, the Ufa Scientific Center, the North Caucasian Federal scientific agrarian center, Kursk FANTS and other researchers. Among the positive effects of direct sowing and no-till, one can distinguish: moisture saving, protection from water and wind erosion, formation of water-resistant soil aggregates, increase in humus content, increase in biological activity of soils, saving energy, labor and financial resources, reduction of greenhouse gas emissions. The negative aspects are associated with an increase in phytotoxicity, an increase in the density of the topsoil, differentiation of the arable layer in terms of fertility, increased infestation of crops, plant susceptibility to diseases and pests.

Keywords: resource-saving technologies, steppe farming, minimum tillage, direct sowing, no-till, world experience

Применение почвозащитных ресурсосберегающих технологий тесно связано с задачами по обеспечению продовольственной безопасности, реализация которых возможна при получении высоких стабильных урожаев сельскохозяйственных культур,

с одной стороны, и уменьшении воздействия на компоненты природной среды – с другой. В практике мирового земледелия уже более 100 лет разрабатываются и применяются различные почвозащитные ресурсосберегающие приемы, технологии и системы возделывания культур, среди которых в последнее время особое внимание отечественными и зарубежными исследователями уделяется минимальной (Mini-till) и нулевой (No-till) технологиям обработки почвы с формированием мульчирующего слоя и посева в необработанную почву. В основе Mini-till технологии лежат осенние одно- или двухкратные мелкие обработки почвы плоскорезными и (или) дисковыми орудиями. No-till технология основана на прямом посеве в необработанную почву, при этом полностью исключается основная обработка в севообороте, что отличает ее от нулевой обработки, подразумевающей только эпизодический отказ от основной обработки почвы. Такие подходы, направленные на снижение антропогенного воздействия на экосистемы, позволяют получать высокие урожаи и способствуют увеличению утраченного плодородия почв, восстановлению биологического разнообразия, при обеспечении биосферных функций агроландшафтов.

Целью исследования является анализ положительных и отрицательных сторон применения технологий Mini-till и No-till на основе изучения истории развития почвосберегающих технологий и систем земледелия, а также деятельности современных научных центров, занимающихся вопросами совершенствования систем земледелия и оптимизации степного земледелия.

Материал и методы исследования

Материалом для исследования послужили опубликованные научные рабо-

ты отечественных и зарубежных ученых и аграриев-практиков XIX-XXI вв., посвященные развитию приёмов и методов ресурсосберегающего почвозащитного земледелия. Анализ развития теоретических идей и практических приёмов почвозащитного земледелия, результатов стационарных опытов в различных степных регионах мирового земледелия проведён на основе сравнительно-исторического метода.

Результаты исследования и их обсуждение

В настоящее время в мире беспашотное почвозащитное земледелие применяется на площади около 400 млн га, при этом под No-till задействовано 125 млн га (около 9% от всех пахотных угодий) [1]. Среди лидеров использования одной из самых эффективных ресурсосберегающих технологий – No-till – такие страны, как США, Бразилия, Аргентина, Канада, Австралия, Парагвай (табл. 1). На долю России приходится 5 млн га (3%) [1].

Первые опыты по внедрению почвозащитных ресурсосберегающих технологий в России и массовое внедрение нового способа хозяйствования в 90-е годы XX века разделяет почти столетний период с несколькими мировыми экологическими кризисами.

Российские ученые уже в конце XIX – начале XX в. вели работы по адаптации ресурсосберегающих технологий в практику ведения сельскохозяйственного производства. Так, И.А. Стебут, А.А. Измаильский, П.А. Костычев рекомендовали для степных засушливых районов дифференцированную основную обработку почвы, а И.Е. Овсинский, Л.Х. Эван, В.Г. Ротмистров, Н.М. Тулайков – мелкую безотвальную обработку [2].

Таблица 1

Страны – лидеры по площади земель, обрабатываемых по технологии No-till, тыс. га

Государство	Площадь обрабатываемых земель	Площадь земель, обрабатываемых по No-till	% от общей площади
США	113700	23700	20,8
Аргентина	28000	23000	82,1
Бразилия	38400	21863	56,9
Канада	29542	16662	56,4
Австралия	72000	9000	12,5
Парагвай	2200	1500	68,2

Первым, кто выступил против традиционного способа – отвальной вспашки, был наш соотечественник – основоположник почвозащитной системы Иван Евгеньевич Овсинский. Он предложил проводить обработку почвы в сухих степях изобретенным им культиватором «Урожай» на глубину до 7 см, без оборота пласта, с последующим полосно-рядовым (ленточным) посевом повышенной нормой семян, боронованием всходов без прикатывания после посева. Выполнение комплекса мероприятий позволяло накапливать в поверхностном слое органические остатки, сохранять почвенную влагу, усиливать процессы нитрификации и гумификации, получая при этом в условиях засухи высокие урожаи зерновых культур. Обладая, наряду с новаторскими качествами, ещё и талантом пропагандиста, И.Е. Овсинский пишет книгу «Новая система земледелия» [3], которая к 1910 году переиздавалась трижды.

Позднее ряд успешных экспериментов по мелкой и безотвальной обработке почвы был проведен во Франции, Германии, Англии, США, СССР, что в совокупности с экологическими кризисами землепользования на Великих равнинах США 30-40 гг. XX века, распашкой целинных земель в Северном Казахстане, Южном Урале, Поволжье, Сибири конца 50 – начала 60-х годов XX века, спровоцировавших серии жесточайших засух и катастрофических пыльных бурь, а также пыльные бури в «Армавирском коридоре» (Ставропольский и Краснодарский края), в Ростовской, Астраханской и Волгоградской областях, послужило поворотом к ресурсосберегающим технологиям.

Отдельно необходимо отметить разработку и апробацию безотвальной обработки почвы на опытных полях Всесоюзного НИИ зернового хозяйства (Шортанды, Казахстан) с последующим внедрением минимальной обработки (организованным Ф.Т. Моргуном, А.Г. Тарарико, Н.К. Шиколой) в Полтавской области Украины. Разработчиками почвозащитной системы земледелия были Терентий Семенович Мальцев [4] и Александр Иванович Бараев [5].

Основными принципами почвозащитной системы Мальцева – Бараева являются:

1) разноглубинная безотвальная обработка с сохранением на поверхности почвы стерневых остатков (для улучшения теплового и водного режима) с периодическим (1 раз в 4-5 лет) глубоким рыхлением на глубину 35-40 см для разрушения «плужной подошвы»;

2) обязательность паров в зерновых севооборотах (в умеренно засушливой степи 15%, в сухой степи – до 33% от площади пашни);

3) внедрение 3-5-летних зернопаровых севооборотов короткой ротации;

4) безотвальная обработка чистых паров, с посевом кулисных растений, и обязательное проведение снегозадержания для максимального накопления осенне-зимне-весенних осадков;

5) оптимально поздние сроки посева зерновых культур, позволяющие уничтожить сорняки предпосевными обработками в зерно-паровых севооборотах;

6) полосное размещение сельскохозяйственных культур;

7) обработка полей широкозахватными почвозащитными машинами и орудиями: плоскорезами-глубокорыхлителями (КПГ, ГУН, позднее СибИМЭ), противоэрозионными культиваторами (КПЭ), стерневыми сеялками (СЗС), игольчатыми боронами (БИГ, БДГ), снегопахами и др.

В 50-60-е годы XX века фермеры США и Канады сначала по одиночке (фермер из Огайо Э. Фолкнер) [6], а потом и массово стали применять в качестве основной обработки рыхление почвы с оставлением на поверхности стерни соломенной мульчи и внесением при этом в корнеобитаемый слой минеральных удобрений. Внедрение Mini-till и No-till сопровождалось активной государственной поддержкой правительства США, уже в 1980-е годы в Соединенных Штатах площади под минимальную систему обработки почвы возросли с 21 до 33 млн га, а No-till – до 3,0 млн га [7]. Зародившаяся в США и Канаде, No-till, на фоне энергетического кризиса 90-х годов XX столетия, получила широкое распространение в странах Латинской Америки (Аргентине, Бразилии, Парагвае, Чили), Австралии и Новой Зеландии [8]. Причина активного внедрения беспашотных технологий заключается в значительном снижении энергетических и трудовых затрат за счет сокращения некоторых агроприемов (вспашка, боронование, культивация) и совмещения нескольких технологических операций (подготовка посевного ложа, посев, прикатывание, выравнивание поверхности поля, внесения минеральных удобрений).

В настоящее время признанными авторитетами применения No-till являются: Карлос Кроветто (Чили), Герберт Бартиц, Ноно Перейра, Франк Дайкстр, Адемир Каллегари (Бразилия), Джефф Мойер, Рэнди Андерсон, Рик Бибер (США).

В России за четверть века сформировалось несколько научных центров по изучению эффективности применения минимальных и нулевых технологий обработок черноземных почв. Среди них: Почвенный институт им. В.В. Докучаева; Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр; Курский федеральный аграрный научный центр – ВНИИ земледелия и защиты почв от эрозии; Белгородский федеральный аграрный научный центр; Донской государственный аграрный университет ГАУ; Воронежский федеральный аграрный научный центр им. В.В. Докучаева; НИИ сельского хозяйства Крыма; Уфимский научный центр РАН и Башкирский государственный аграрный университет; Самарский НИИ сельского хозяйства им. Н.М. Тулайкова; Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока в Саратове; Волгоградский ГАУ и Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН; Оренбургский федеральный исследовательский центр УрО РАН и Оренбургский государственный аграрный университет; Челябинский НИИ сельского хозяйства; Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН.

Перспективы No-till, по мнению ряда исследователей [9-11], связаны в первую очередь с созданием и сохранением достаточно «мощного» мульчирующего слоя (не менее 3-5 см) из растительных остатков предшествующих культур, что способствует:

- снижению испарения влаги путем снижения температуры поверхностного слоя почвы, уменьшению диффузии водяного пара, что, в свою очередь, способствует накоплению большего количества влаги в корнеобитаемом слое почвы, предоставляя возможность возделывания влаголюбивых сельскохозяйственных культур в засушливых условиях степей [12-14];

- увеличению скорости инфильтрации влаги и значительному снижению скорости поверхностного стока, особенно в засушливых климатических условиях [14; 15];

- снижению интенсивности минерализации гумуса и накоплению в поверхностном слое почвы доступных растению элементов питания (N, P, K) [16; 17], что позволяет сократить внесение минеральных удобрений [18];

- повышению биологической активности почв и темпов прироста органического вещества [12], способствуя увеличению за-

пасов влаги, росту азотации и синхронизации роста растений – микробиологической активности и поглощения питательных веществ [17; 19];

- защите от проявлений водной и ветровой эрозии на 50-90% (растительные остатки защищают почву от воздействия дождевых капель и распыления и способствуют снижению скорости ветра в надпочвенной зоне) [20; 21];

- формированию водопрочных почвенных агрегатов [22] и снижению их разрушения, а также снижению объемной плотности и увеличению общей пористости почвы [23; 24];

- обеспечению высокой оперативности проведения полевых работ в условиях максимально сжатых сроков, обусловленных климатическими и технологическими факторами [25];

- уменьшению эмиссии парниковых газов (особенно CO₂) [26];

- сокращению текущих и инвестиционных расходов (экономия энергетических (до 50%), трудовых и финансовых ресурсов) при существенном повышении рентабельности и производительности труда [9; 25; 27].

Одним из самых важных показателей получения высокого урожая сельскохозяйственных культур в засушливых условиях степной зоны является накопление и сохранение влаги в корнеобитаемом слое почвы. Показательными по уменьшению испарения и рациональному использованию влаги при применении минимальных обработок и прямого посева являются опыты, проведенные в Ростовской области на черноземе обыкновенном (табл. 2) [14].

Учитывая быструю потерю влаги в посевном слое почвы в варианте с зяблевой отвальной вспашкой, посев был проведен в более ранние сроки в холодную и переувлажненную почву, что привело к уплотнению слоя распространения корней растений, прямой посев же проведен в оптимальные сроки физической спелости почвы [14]. Данное обстоятельство, а также потери влаги при проведении 6-7 технологических операций при традиционной технологии, позволили на варианте прямого посева лучше сохранять влагу и в конечном итоге получить урожай выше, чем при варианте с отвальной вспашкой. Минимальные затраты влаги при прямом посеве подтверждаются показателем расхода влаги на образование 1 т семян (150,4 мм).

Таблица 2

Водопотребление при возделывании подсолнечника в зависимости от технологии обработки почвы (слой 0-150 см) (среднее за 7 лет) [14]

Варианты	Весенние запасы влаги в почве, мм	Запасы влаги в почве перед уборкой, мм	Урожайность, ц/га	Расход влаги (мм) на образование 1 т семян
Зяблевая вспашка на глубину 25-27 см + полный комплекс агроприемов (контроль)	242,8	99,3	16,6	222,9
Минимальная обработка (осеннее дискование + полный комплекс агроприемов)	240,5	105,9	17,5	197,9
Прямой посев	276,0	144,6	22,9	150,4

Таблица 3

Содержание агрономически ценных агрегатов (0,25-10 мм) весной на паровом поле, % [23]

Технологические комплексы	Количество осадков за сентябрь – апрель < 260 мм (за 7 лет)	Количество осадков за сентябрь – апрель > 295 мм (за 4 года)
Ежегодная вспашка под все культуры севооборота (контроль)	61,4	69,2
Дифференцированная 1 (под пары – глубокое рыхление, под зерновые – минимальная обработка)	61,7	69,2
Минимальная обработка под все культуры севооборота	64,5	69,5
Дифференцированная 2 (под сидеральный пар – глубокое рыхление, под зерновые – прямой посев)	65,8	70,2

Количество растительных остатков, безусловно, зависит от сельскохозяйственной культуры и накопленной почвой надземной и подземной биомассы. В Западной Сибири нулевая обработка обеспечивает поступление в среднем за год на поверхность почвы 1,8-2,1 т/га [28], а на Северном Кавказе – 5,6-6,3 т/га растительных остатков [17]. Ежегодное поступление такого количества пожнивных остатков улучшает структуру почвы [29], защищая от проявлений дефляции и водной эрозии [17].

Результаты опытов по влиянию минимизации обработок на сохранение водопроходной структуры черноземов, проведенных на стационаре отдела земледелия и новых технологий Самарского НИИСХ, показывают, что при поверхностном внесении соломы и обработке почвы с применением прямого посева зафиксировано наибольшее значение агрономически ценных агрегатов (65,8 и 67,4%), что на 4,4 и 1 мм выше контроля [23]. Лучший результат по применению прямого посева был получен в засушливые годы (табл. 3).

В опытах Курского ФАНЦ и ФГБНУ «НИИСХ ЦЧП им. В.В. Докучаева» с высокой степенью достоверности установлено, что использование прямого посева максимально способствует увеличению содержания органического вещества по сравнению с отвальной, комбинированной и минимальной обработками. При этом через 4 года содержание гумуса в черноземе типичном в слое 0-10 см увеличилось на 0,65% и в слое 10-20 см – на 0,86%, а запас гумуса в слое 0-30 см увеличился на 59,9 т/га [16].

При всех преимуществах No-till эффективность её применения, т.е. увеличение урожайности с.-х. культур, появляется только через 5-7 лет [30], а биоценоз почвы восстанавливается через 10 лет, начиная активно работать на воспроизводство плодородия почвы. Эта закономерность в целом подтверждается мировым опытом ведения земледелия по No-till [31].

Важными условиями реализации Mini-till и No-till являются существенное расширение перечня возделываемых культур (диверсификация культур) [32] и формирование

севооборотов с ежегодным чередованием злаковых и широколиственных культур, отказ от парового поля в пользу сидерального.

Среди недостатков прямого посева и No-till, особенно при наличии большого количества и неравномерного распределения по полю послеуборочных остатков, зарубежные и российские ученые отмечают: увеличение засорённости посевов [32; 33], изменение видового состава сорняков с увеличением однодольных [30]; повышенное поражение растений болезнями (особенно корневыми гнилями, мучнистой росой и бурой листовой ржавчиной) и вредителями (хлебной жужелицей, проволочниками, трипсами, мышевидными грызунами и др.) [34]; уплотнение корнеобитаемого слоя в первые 4 года применения прямого посева [10; 30; 35]; дифференциация пахотного слоя по уровню плодородия [36], снижение интенсивности минерализации азота в первых двух ротациях севооборотов [12; 22]; увеличение опасности содержания остаточного количества химических веществ и пестицидов выше необходимого уровня [10; 37].

Негативное влияние этих факторов можно существенно ослабить или устранить правильным подбором и чередованием сельскохозяйственных культур в структуре севооборотов, регулированием сроков сева и норм высева семян, внесением достаточных доз элементов питания растений (NPK и микроудобрений) и химических средств защиты растений (в т.ч. биологических гербицидов), посевом промежуточных почвопокровных культур после уборки и до посева следующей культуры севооборота [14; 15; 30].

Необходимо отметить, что прямой посев и No-till высокотехнологичны и требуют специальных широкозахватных, комбинированных агрегатов (в основном посевных комплексов с культиваторными, дисковыми и анкерными рабочими органами), с одновременным внесением минеральных удобрений, которые позволяют совмещать несколько операций в одном проходе техники (одновременное безотвальное рыхление, прикатывание, выравнивание поверхности почвы) и осуществлять тщательную подготовку посевного ложа.

Заключение

Анализ истории развития почвосберегающих технологий и систем земледелия, деятельности современных научных центров, занимающихся вопросами совершенствования систем земледелия и оптимизации степного землепользования, позволяет вы-

делить ряд эволюционных особенностей, а также положительные и отрицательные аспекты применения ресурсосберегающих технологий в степном земледелии.

Сравнительный анализ развития научных исследований по разработке, апробации и внедрению в практику сельскохозяйственного производства ресурсосберегающих технологий показал, что качественные «скачки» в развитии почвозащитного земледелия отмечались после масштабных социально-экономических и экологических кризисов природопользования в степях и прериях земледельческих регионов (кризис степного землепользования в России 1891-1893 гг., Великих равнин США 30-40-х гг. XX века, освоение целинных и залежных земель в Казахстане, Южном Урале, Поволжье и Сибири 50-60-х гг. XX века). В России идея минимальной обработки почвы появилась раньше, а в США технологии Mini-till и No-till были более всесторонне апробированы и, при государственной поддержке, внедрены в практику работы фермерских хозяйств североамериканского континента.

Среди положительных сторон применения прямого посева и No-till необходимо выделить, прежде всего, влагосбережение, снижение темпов минерализации гумуса, повышение биологической активности почвенной мезофауны, защиту от водной эрозии и дефляции, сокращение затрат на производство продукции, уменьшение эмиссии парниковых газов (особенно CO₂). Отрицательные стороны применения прямого посева и No-till, по мнению большинства исследователей, работающих над данной проблематикой, связаны с повышением фитотоксичности, увеличением плотности корнеобитаемого слоя почвы, дифференциацией пахотного слоя по плодородию, повышенной засорённостью посевов, порождаемой засорённостью посевов, поражением растений болезнями и вредителями, а также потенциальным загрязнением верхнего слоя почвы.

В целом минимизация обработки почвы и No-till, направленные на оптимизацию степного землепользования, требуют серьёзной апробации влияния их на почвенное плодородие, агрофизические и химические свойства почвы, начиная от плотности и структурного состояния, повышения содержания органического вещества до определения уровня пестицидной нагрузки на почвенный и растительный покров.

Статья подготовлена по теме НИР Института степи УрО РАН № АААА-А21-121011190016-1.

Список литературы

1. Blanco-Canqui H., Ruis S.J. No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*. 2018. Vol. 326. P. 164-200.
2. Шептухов В.Н. Минимизация обработки и прямой посев в технологиях возделывания культур. М.: ГУЗ, 2005. 197 с.
3. Овсинский И.Е. Новая система земледелия. Киев-Харьков, 1899. 138 с.
4. Мальцев Т.С. Новая система обработки почвы и посева. Курган: Красный Курган, 1954. 60 с.
5. Почвозащитное земледелие / Под общ. ред. акад. А.И. Бараева. М.: Колос, 1975. 304 с.
6. Фолкнер Э.Х. Безумие пахаря. М.: Госиздат с.-х. литературы, 1959. 276 с.
7. Грошева О.А. Развитие теоретических идей и практических приемов почвозащитного земледелия: отечественный и зарубежный опыт // Успехи современного естествознания. 2021. № 11. С. 13-18.
8. Friedrich T., Kassam A., Derpsch R. Overview of the Global Spread of Conservation Agriculture. Field actions science reports. 2012. Special Iss. 6. P. 1-7.
9. Аллен Х.П. Прямой посев и минимальная обработка почвы / Пер. с англ. М.Ф. Пушкарева. М.: Агропромиздат, 1985. 208 с.
10. Кроветто К.К. No-till. Взаимосвязь между No-till, растительными остатками, питанием растений и почвы. Днепропетровск: Агросоюз, 2007. 235 с.
11. Mulumba L. N., Lal R. Mulching effects on selected soil physical properties. *Soil and Tillage Research*. 2008. Vol. 98. No. 1. P. 106-111.
12. Сулейменов М.К. Сберегающее плодосменное земледелие Северного Казахстана // Новости науки Казахстана. 2013. Вып. 4 (118). С. 9-27.
13. Женченко К.Г., Турин Е.Н., Гонгало А.А. Результаты изучения системы земледелия прямого посева (no-till) при выращивании озимой пшеницы в Центральной степи Крыма // Зерновое хозяйство России. 2020. № 5(71) С. 45-52.
14. Зеленский Н.А., Зеленская Г.М., Шуркин А.Ю. Влияние различных технологий возделывания подсолнечника на водный режим почвы и его продуктивность // Вестник Донского государственного аграрного университета. 2020. № 4-1(38). С. 101-111.
15. Гулянов Ю.А. Стратегии новационного землепользования и роль природоподобных агротехнологий в экологической оптимизации степных ландшафтов // Сборник научных трудов ГНБС. 2019. Т. 148. С. 50-59.
16. Гребенников А.М., Исаев В.А., Юдин С.А., Чевердин Ю.И., Гармашов В.М., Нужная Н.А., Корнилов И.М. Влияние способов обработки миграционно-мицелярных черноземов на урожайность сельскохозяйственных культур // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2019. № 2. С. 38-41.
17. Дридригер В.К., Иванов А.Л., Белобров В.П., Кутюва О.В. Восстановление свойств почв в технологии прямого посева // Почвоведение. 2020. № 9. С. 1111-1120.
18. Brouder S.M., Macpherson H.G. The impact of conservation agriculture on smallholder agricultural yields: A scoping review of the evidence. *Agriculture, ecosystems and environment*. 2014. Vol. 187. P. 11-32.
19. Briones M.J.I., Schmidt O. Conventional tillage decreases the abundance and biomass of earthworms and alters their community structure in a global meta-analysis. *Global change biology*. 2017. Vol. 23. Iss. 10. P. 4396-4419.
20. Дридригер В.К., Белобров В.П., Антонов С.А., Юдин С.А., Гаджимаров Р.Г., Лиходиевская С.А., Ермолаев Н.Р. Защита почв от водной эрозии и дефляции в технологии No-till // Земледелие. 2020. № 6. С. 11-17.
21. Vach M., Hlisnikovsky L., Javurek M. The Effect of Different Tillage Methods on Erosion. *Agriculture (Pol'nohospodarstvo)*. 2018. Vol. 64. No. 1. P. 28-34.
22. Власенко А.Н., Власенко Н.Г., Кудашкин П.И. Эффективность No-till технологии на черноземных почвах северной лесостепи Западной Сибири // Сельскохозяйственный журнал. 2021. № 5 (14). С. 6-13.
23. Горянин О.И. Влияние современных технологий возделывания на агрофизические свойства чернозема обыкновенного в Среднем Поволжье // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2012. № 3(35). С. 23-26.
24. Акшалов К.А., Кужинов М.Б. Влияние системы No-till на водно-физические свойства почвы // Вестник Кыргызского национального аграрного университета им. К.И. Скрябина. 2017. № 2 (43). С. 34-40.
25. Небавский В.А. Опыт внедрения технологии нулевой обработки почвы. Краснодар, 2003. 134 с.
26. Верхулист Н., Франсуа И., Говаэртс Б. Сохранение почвенного углерода: миф и реальность // Почвозащитное и ресурсосберегающее земледелие: теория и методика исследований / Под ред. Х. Муминджанова. Анкара, 2015. С. 35-53.
27. Горянин О.И., Шевченко С.Н. Эффективность технологий прямого посева зерновых культур в Среднем Поволжье // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2018. № 4 (72). С. 36-39.
28. К вопросу о формировании фитосанитарной ситуации в посевах в системе No-till / Под ред. Н.Г. Власенко, Н.А. Власенко, И.Г. Бокина. Новосибирск: Сиб. НИИ земледелия и химизации, 2013. 124 с.
29. Габбасова И.М., Сулейманов Р.Р., Хабилов И.К., Комиссаров М.А., Гарипов Т.Т., Сидорова Л.В., Асылбаев И.Г., Рафиков Б.В., Яубасаров Р.Б. Оценка агрочерноземов Зауральской степи в условиях использования системы обработки почвы No-till // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2014. № 6. С. 32-36.
30. Бакиров Ф.Г., Поляков Д.Г., Халин А.В., Баландина А.А. Прямой посев и No-till в Оренбуржье // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2018. № 5 (73). С. 50-54.
31. Lampurlanes J., Plaza-Bonilla D., Alvaro-Fuentes J., Cantero-Martinez C. Long-term analysis of soil water conservation and crop yield under different tillage systems in Mediterranean rainfed conditions. *Field Crops Research*. 2016. Vol. 189. P. 59-67.
32. Дридригер В.К., Невечера А.Ф., Токарев И.Д., Вайцевская С.С. Экономическая эффективность технологии No-till в засушливой зоне Ставропольского края // Земледелие. 2017. № 3. С. 16-19.
33. Пыхтин И.Г. Обработка почвы: действительность и мифы // Земледелие. 2017. № 3. С. 33-36.
34. Кирюшин В.И. Задачи научно-инновационного обеспечения земледелия России // Земледелие. 2018. № 3. С. 3-12.
35. Ogle S.M., Swan A., Paustian K. No-till management impacts on crop productivity, Carbon input and soil carbon sequestration. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2012. Vol. 149. P. 37-49.
36. Du Z., Zhang Q., Li G., Angers D.A., Ren T. The effect of no-till on organic C storage in Chinese soils should not be overemphasized: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2017. No. 236. P. 1-11.
37. Mumme M., Ammon F. Does the direct seeding have no future? *New agriculture*. 2020. No. 2. P. 34-38.

СТАТЬИ

УДК 504.064.47:504.064.36

**ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ В УПРАВЛЕНИИ
ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ОБЪЕКТОВ РАЗМЕЩЕНИЯ
ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ (ТКО)****Ашихмина Т.В.***ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж,
e-mail: priem@vgasu.vrn.ru*

В Воронежской области распространенным способом обращения с твердыми коммунальными отходами (ТКО) является их размещение на специализированных объектах – полигонах, наряду с которыми также существует значительное количество несанкционированных свалок. Накопление и трансформация отходов на локальных территориях в различных геоэкологических условиях в течение длительного времени сопровождается воздействием на все компоненты экогеосферы и формирует открытую, находящуюся в постоянной вещественно-энергетической связи с внешней средой, антропогенную геоэкологическую систему (АГС) «Объект размещения отходов» (ОРО). Сравнительный анализ характеристик объектов размещения ТКО позволяет идентифицировать эти объекты как источники загрязнения окружающей среды, к приоритетным факторам экологической опасности которых относятся: эмиссия биогаза и фильтрата из тела полигона; поверхностный сток; формирование техногенных грунтов и рельефа, патогенной микрофлоры. Геоэкологический мониторинг состояния окружающей среды в районе расположения всех объектов размещения отходов является ключевым аспектом управления их экологической безопасностью. Виды геоэкологического мониторинга определяются на основе анализа и сопоставления приоритетных факторов экологической опасности объектов размещения отходов и условий окружающей среды, подлежащих оценке. Программу мониторинга следует изменять в зависимости от условий эксплуатации полигонов в разных геоэкологических условиях. В статье представлена система геоэкологического мониторинга полигонов ТКО, находящихся в различных природно-ландшафтных районах Воронежской области. Постоянный мониторинг объектов размещения отходов и прилегающих территорий позволяет проанализировать динамические параметры негативных процессов и разработать решения по управлению экологической безопасностью ОРО. Алгоритм принятия решений по управлению экологической безопасностью АГС ОРО включает поэтапный анализ факторов экологической опасности и рисков, прогнозирование масштабов и динамики геоэкологических процессов, оценку накопленного вреда окружающей среде на объектах размещения отходов разных статусов и этапов жизненного цикла.

Ключевые слова: геоэкологический мониторинг, экологическая безопасность, антропогенная геоэкологическая система «объект размещения отходов», полигон ТКО, несанкционированная свалка, управление экологической безопасностью

**GEO-ENVIRONMENTAL MONITORING IN ENVIRONMENTAL
SAFETY MANAGEMENT SAFETY OF SOLID MUNICIPAL
WASTE DISPOSAL FACILITIES****Ashikhmina T.V.***Voronezh State Technical University, Voronezh, e-mail: priem@vgasu.vrn.ru*

In Voronezh Region the common way of solid municipal waste management is their disposal at specialized facilities – landfills, along with a significant number of unauthorized landfills. Accumulation and transformation of waste in local areas in various geoecological conditions for a long time is accompanied by an impact on all components of the ecogeosphere and form an open anthropogenic geoecological system (AGS) “Waste Disposal Facility” (ORO) that is in constant material and energy connection with the environment. A comparative analysis of the characteristics of MSW disposal facilities allows us to identify these objects as sources of environmental pollution, the priority environmental hazard factors of which include: emissions of biogas and leachate from the landfill body; surface runoff; formation of technogenic soil and relief, pathogenic microflora. Geoecological monitoring of the state of the environment in the area where all waste disposal facilities are located is a key aspect of managing their environmental safety. Types of geoecological monitoring are determined based on the analysis and comparison of priority environmental hazard factors for waste disposal sites and environmental conditions to be assessed. The monitoring program should be changed depending on the operating conditions of the landfills in different geoecological conditions. The article presents a system of geoecological monitoring of MSW landfills located in various natural and landscape areas of the Voronezh region. Constant monitoring of waste disposal sites and adjacent territories allows analyzing the dynamic parameters of negative processes and developing solutions for managing the environmental safety of the RDP. The decision-making algorithm for managing the environmental safety of AGS ORO includes a step-by-step analysis of environmental hazards and risks, forecasting the scale and dynamics of geoecological processes, assessing the accumulated environmental damage at waste disposal sites of different statuses and life cycle stages.

Keywords: geoecological monitoring, environmental safety, anthropogenic geoecological system “waste disposal facility”, MSW landfill, unauthorized dump, environmental safety management

В числе образующихся в Воронежской области отходов существенную часть составляют твердые коммунальные отходы (ТКО). Годовой объем их образования в целом по области составляет более 2,5 млн м³, или 20% от общего количества отходов [1, 2].

Организованное (на полигонах) и неорганизованное (на несанкционированных свалках) длительное размещение отходов сопровождается процессами взаимодействия их и продуктов трансформации со всеми компонентами окружающей среды, формированием зон геохимического загрязнения вокруг объектов. Разработка эффективных решений по управлению экологической безопасностью объектов размещения ТКО возможна только на базе комплексных и систематических мониторинговых исследований как самих объектов, так и прилегающих территорий.

Целью работы является адаптация методологии геоэкологического мониторинга к объектам размещения отходов и разработка алгоритма принятия решений по управлению их экологической безопасностью.

Основные задачи:

- провести сравнительную характеристику объектов размещения ТКО как источников загрязнения окружающей среды;
- проанализировать факторы экологической опасности антропогенной геоэкологической системы «Объект размещения отходов» (АГС ОРО) и соответствующие виды геоэкологического мониторинга;
- разработать систему геоэкологического мониторинга территорий полигонов ТКО в зависимости от условий их эксплуатации в разных природно-ландшафтных районах Воронежской области;
- разработать алгоритм принятия решений по управлению экологической безопасностью АГС «объект размещения ТКО» на основе мониторинговых исследований.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являются объекты размещения ТКО, расположенные в геоэкологических условиях Воронежской области.

Оценка объемов образования твердых коммунальных отходов в Воронежской области представлена в табл. 1 [3].

В настоящее время в Воронежской области основным способом обращения с отходами является размещение их на специальных объектах – полигонах. На территории области расположены 17 полигонов ТКО, включенных в Государственный реестр объектов размещения отходов (ГРОРО). Ежегодное количество отходов, размещенных на полигонах ТКО и свалках, составляет 1094,581 тыс. т [2].

Согласно данным, приведенным в территориальной схеме размещения отходов, в Воронежской области 80–100% полигонов ТКО являются старыми, их эксплуатация началась во второй половине прошлого столетия, в настоящее время они достигли предела проектной вместимости.

Наряду с полигонами ТКО на территории Воронежской области присутствуют также несанкционированные свалки, число которых в 2015 г. составило 57 объектов, в 2019 г. – 232 объекта, в 2021 г. – 172 объекта [2].

Сравнительная характеристика ОРО, как источников загрязнения окружающей среды, проводилась методом анализа сходства и различия изучаемых объектов.

Разработка системы геоэкологического мониторинга осуществлялась на основе анализа приоритетных факторов опасности АГС «Объект размещения отходов» для окружающей среды и определения условий окружающей среды, подлежащих оценке, а также на основе метода совмещенного анализа карт.

Предложенный алгоритм принятия решений по управлению экологической безопасностью АГС «Объект размещения ТКО» базируется на поэтапном анализе факторов экологической опасности, рисков, прогнозировании масштабов и динамики геоэкологических процессов, оценке накопленного вреда окружающей среде на объектах размещения отходов разного возраста и статуса.

Таблица 1

Объемы образования ТКО в Воронежской области [3]

Показатели	2019 г.	2020 г.	2021 г.
Образование ТКО за отчетный год на основании данных федерального статистического наблюдения по форме 2-ТП (отходы), т	1000301	838 587	970 061
Направлено на захоронение, т	697210	834 027	938 311

Результаты исследования и их обсуждение

Масштаб образования отходов производства и потребления, их организованное и неорганизованное накопление в различных геоэкологических условиях в течение длительного времени позволяют рассматривать отходы и процессы их трансформации как факторы, оказывающие воздействие на все компоненты экогеосферы и формирующие открытую, находящуюся в постоянной вещественно-энергетической связи с внешней средой, антропогенную геоэкологическую систему (АГС) «Объект размещения отходов» [4].

Результаты разносторонних исследований [5–8] подтверждают длительное негативное воздействие таких систем на качество окружающей природной среды, выражающееся, прежде всего, в загрязнении ее компонентов и формировании накопленного вреда окружающей среде.

Таким образом, все объекты размещения отходов – как полигоны ТКО, так и несанкционированные свалки – являются источниками загрязнения окружающей среды, сравнительная характеристика которых представлена в табл. 2.

Процессы взаимодействия АГС «Объект размещения отходов» с окружающей средой имеют особенности в зависимости от возраста объекта и геоэкологических условий, в которых он находится.

Комплексное геоэкологическое исследование территории размещения АГС

«Объект размещения отходов» позволяет ранжировать компоненты окружающей среды и районировать территорию по приоритетной опасности воздействия объекта [11].

К приоритетным факторам экологической опасности объектов размещения отходов относятся: эмиссия биогаза из тела полигона; эмиссия фильтрата из тела полигона, поверхностный сток; формирование техногенного рельефа; формирование патогенной микрофлоры; формирование техногенного грунта.

Обязательным мероприятием по обеспечению экологической безопасности всех объектов размещения отходов является проведение комплексного геоэкологического мониторинга состояния окружающей среды в районе их расположения (табл. 3).

Программу проведения мониторинга следует изменять в зависимости от условий эксплуатации полигонов в разных природно-ландшафтных районах Воронежской области. Так, проведенное районирование территории Воронежской области по водопроницаемости грунтов позволило выделить шесть районов, различающихся по геоэкологическим условиям, оказывающим наибольшее влияние на экологическую безопасность полигонов ТКО [12]. Распределение полигонов ТКО по выделенным районам показано на рисунке.

На основе проведенного районирования территории Воронежской области разработана система геоэкологического мониторинга территорий полигонов ТКО (табл. 4).

Таблица 2

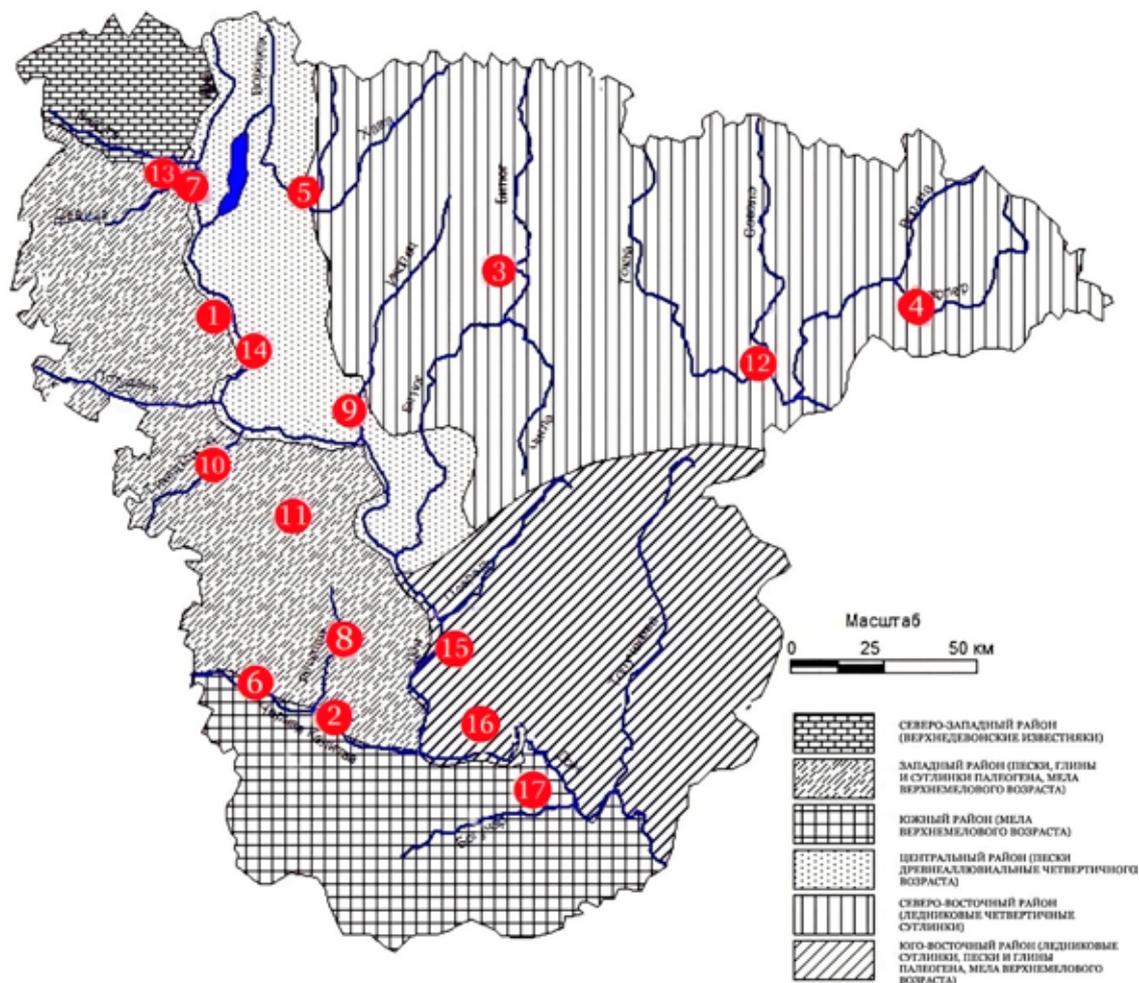
Сравнительная характеристика объектов размещения ТКО,
как источников загрязнения окружающей среды

Характеристики	Вид объекта размещения ТКО	
	Полигон	Несанкционированная свалка
Происхождение	Антропогенный объект	Антропогенный объект
Расположение	На поверхности Земли	На поверхности Земли
Принадлежность	Есть управляющая компания	Бесхозный объект
Эксплуатация объекта	Регламентируется [9,10]	Не регламентируется, происходит стихийно
Источник химического воздействия	Отходы ТКО IV–V классов опасности (малоопасные и практически неопасные)	Промышленные и коммунальные отходы I–V классов опасности (не контролируются)
Природоохранные мероприятия	Предусмотрены при строительстве и эксплуатации	Отсутствуют
Система мониторинга окружающей среды	Предусмотрена	Отсутствует

Таблица 3

Факторы экологической опасности АГС «Объект размещения отходов»
и соответствующие виды геоэкологического мониторинга

Воздействие АГС «Объект размещения отходов» на ОС	Приоритетные факторы опасности для окружающей среды	Условия окружающей среды, подлежащие оценке	Виды геоэкологического мониторинга
Эмиссия биогаза из тела полигона	1. Влияние на компонентный состав атмосферы (парниковый эффект). 2. Неприятный запах и загрязняющие вещества в воздухе близлежащих населенных мест (качество среды обитания). 3. Рассеивание и последующее осаждение загрязняющих веществ на территориях, прилегающих к объекту	1. Метеорологические параметры. 2. Концентрация загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. 3. Расположение населенных территорий	1. Гидрометеорологический мониторинг. 2. Мониторинг атмосферного воздуха
Эмиссия фильтрата из тела полигона, поверхностный сток	1. Загрязнение подземных и поверхностных вод. 2. Загрязнение почв прилегающих территорий	1. Водопроницаемость рельефообразующих пород. 2. Глубина и защищенность подземных вод, наличие водозаборов. 3. Расположение поверхностных водных объектов на прилегающей территории, вектор движения подземных вод	1. Мониторинг качества поверхностных и подземных вод. 2. Мониторинг и оценка фильтрационных параметров водоносных горизонтов, скорости движения подземных вод
Формирование техногенного рельефа	1. Влияние на устойчивость естественных форм рельефа. 2. Влияние на динамику экзогенного рельефообразования. 3. Проявления неблагоприятных и опасных геоморфологических процессов. 4. Изменение параметров солнечной инсоляции и адвекции	1. Геоморфологические параметры территории. 2. Параметры экзогенной геодинамики	1. Мониторинг экзогенных геологических процессов
Формирование патогенной микрофлоры	1. Микробиологическое загрязнение подстилающих грунтов. 2. Микробиологическое загрязнение почв на прилегающей территории 3. Микробиологическое загрязнение подземных и поверхностных вод. 4. Распространение патогенной микрофлоры представителями фауны	1. Водопроницаемость рельефообразующих пород. 2. Глубина и защищенность подземных вод, наличие водозаборов. 3. Расположение поверхностных водных объектов на прилегающей территории, вектор движения подземных вод. 4. Параметры биологической и микробиологической активности почв прилегающих территорий. 5. Количественный и видовой состав фауны	1. Мониторинг состояния почвогрунтов, подземных и поверхностных вод по микробиологическим и санитарно-паразитологическим показателям
Формирование техногенного грунта	1. Замена естественных почв и грунтов техногенно сформированными с высокой концентрацией техногенных элементов. 2. Ограничения по использованию территорий после ассимиляции отходов окружающей средой	1. Структура почвенного покрова территории. 2. Характеристики продуктивности почв.	1. Мониторинг состояния почвогрунтов по химическим, микробиологическим, санитарно-паразитологическим показателям.



Размещение полигонов ТКО в различных природно-ландшафтных районах Воронежской области:
 1 – полигон ТБО городской округ г. Нововоронеж; 2 – Россошанский полигон ТКО; 3 – Аннинский полигон ТБО; 4 – полигон ТБО Борисоглебский городской округ; 5 – Новоусманский полигон ТБО;
 6 – Ольховатский полигон ТБО; 7 – Семилукский полигон ТБО; 8 – Подгоренский полигон ТБО;
 9 – Лискинский полигон ТБО; 10 – полигон ТБО г. Острогожск 1 очередь 1 секция;
 11 – Каменский полигон ТБО; 12 – Новохоперский полигон ТБО; 13 – Семилукский полигон ТБО (Каскад);
 14 – полигон ТБО п. Давыдовка (Лискинский район, п. Давыдовка); 15 – Павловский полигон ТБО;
 16 – Верхнемамонский полигон ТБО; 17 – Божучарский полигон ТБО

Таблица 4

Система геоэкологического мониторинга территорий полигонов ТКО в Воронежской области с учетом природно-ландшафтного районирования

Районы	Система мониторинга полигона ТКО									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Северо-западный	+	++	+	+	++	++	++	+	+	+
Западный	+	++	+	+	++	++	++	+	+	+
Южный	+	+	+	+	+	++	++	+	+	+
Центральный	+	+	+	+	+	++	++	+	+	+
Северо-восточный	+	*	+	+	+	*	++	+	+	+
Юго-восточный	+	*	+	+	+	*	+	+	+	+

+ – обычная программа; ++ – расширенная программа; * – сокращенная программа

1. Мониторинг поступающих отходов препятствует захоронению запрещенных отходов. 2. Мониторинг складирования отходов, которые должны своевременно экранироваться и размещаться по картам. 3. Мониторинг санитарно-защитной зоны (СЗЗ) проводится для ее сохранения. 4. Мониторинг шумового загрязнения среды: контроль уровня шума на полигоне и границах СЗЗ. 5. Мониторинг состояния атмосферного воздуха: проводится на полигоне и границах СЗЗ. 6. Мониторинг состояния подземных вод: контроль проникновения фильтрата

в подземные воды. 7. Мониторинг поверхностных вод: контроль загрязнения поверхностным и подземным стоком полигона. 8. Мониторинг почв в СЗЗ. 9. Мониторинг растительности СЗЗ. 10. Мониторинг противоэпидемиологических мероприятий.

Постоянный мониторинг объектов размещения отходов и прилегающих территорий позволяет проанализировать динамические параметры негативных процессов и разработать решения по управлению экологической безопасностью объекта размещения отходов (табл. 5).

Таблица 5

Алгоритм принятия решений по управлению экологической безопасностью АГС «объект размещения ТКО»

Алгоритм принятия решений по управлению экологической безопасностью проектируемых полигонов ТКО	Алгоритм принятия решений по управлению экологической безопасностью существующих полигонов ТКО	Алгоритм принятия решений по управлению экологической безопасностью несанкционированных объектов размещения ТКО
1. Геоэкологический анализ территории на основе данных метеорологического, геологического гидрологического, атмосферного многолетнего мониторинга	1. Ретроспективное моделирование геоэкологических процессов на объектах размещения ТКО на основе архивных данных метеорологического мониторинга на территории размещения объекта	1. Геоэкологический анализ территории на основе данных метеорологического, геологического гидрологического, атмосферного многолетнего мониторинга
2. Моделирование и прогнозирование процессов взаимодействия объекта размещения отходов с окружающей средой на всех этапах его существования на базе мониторинговых исследований подобных объектов	2. Анализ механизма формирования и оценка накопленного вреда окружающей среде на основе геохимического мониторинга компонентов окружающей среды, подвергшихся воздействию объекта размещения отходов	2. Оценка воздействия объекта на геосферы. Картографическое моделирование распределения в геосферах загрязняющих веществ на основе данных многолетнего геоэкологического мониторинга
3. Анализ и оценка геоэкологических рисков по приоритетности в конкретных условиях с использованием данных геологического, гидрологического мониторинга, мониторинга подземных вод, почв атмосферного воздуха	3. Прогнозирование масштабов и динамики геоэкологических процессов при дальнейшем существовании объекта с применением экстраполяции существующих данных мониторинга исследуемого объекта, а также других аналогичных объектов	3. Оценка накопленного вреда (ущерба) окружающей среде на базе данных мониторинга загрязнения компонентов окружающей среды
4. Разработка экозащитных решений для каждого этапа с учетом приоритетных рисков, в том числе системы и программ мониторинга экогеосферы	4. Анализ и оценка геоэкологических рисков по приоритетности в конкретных условиях с использованием данных геологического, гидрологического мониторинга, мониторинга подземных вод, почв атмосферного воздуха	4. Разработка решений по ликвидации объекта, включающих системы экологического мониторинга в период проведения работ, а также после ликвидации объекта для оценки экологической эффективности реализованных решений
	5. Разработка экозащитных решений для каждого последующего этапа с учетом приоритетных рисков, в том числе системы и программ мониторинга экогеосферы	5. Разработка решений по ликвидации накопленного вреда окружающей среде, включающих системы экологического мониторинга в период проведения работ, а также после ликвидации объекта для оценки экологической эффективности реализованных решений

Заключение

Осуществление сравнительной характеристики объектов размещения ТКО позволяет рассматривать эти объекты как антропогенные геоэкологические системы, имеющие схожие идентификационные характеристики, но существенно различающиеся по условиям и возможностям их воздействия на окружающую среду.

Анализ факторов экологической опасности АГС ОРО позволяет выделить и сопоставить приоритетные факторы опасности для окружающей среды, условия окружающей среды, подлежащие оценке с целью оптимизации геоэкологического мониторинга – обязательного мероприятия по обеспечению экологической безопасности всех объектов размещения отходов.

Программу проведения мониторинга следует изменять в зависимости от геоэкологических условий эксплуатации. В качестве примера разработана система геоэкологического мониторинга территорий полигонов ТКО Воронежской области на основе районирования ее территории по водопроницаемости грунтов. В зависимости от условий эксплуатации полигонов в выделенных районах программа мониторинга может быть обычной, расширенной, сокращенной.

Постоянный мониторинг объектов размещения отходов и прилегающих территорий позволяет проанализировать динамические параметры негативных процессов и разработать решения по управлению экологической безопасностью объекта размещения отходов.

В основе разработанного алгоритма принятия решений по управлению экологической безопасностью АГС ОРО находится:

- поэтапный анализ факторов экологической опасности и рисков;
- прогнозирование масштабов и динамики геоэкологических процессов;
- оценка накопленного вреда окружающей среде на объектах размещения отходов.

Ключевым аспектом применения разработанного алгоритма является идентификация объекта размещения отходов по его статусу и этапу жизненного цикла.

Результаты исследования и предложенные решения могут быть использованы в процессе проектирования и эксплуатации

полигонов ТКО, а также в постэксплуатационном периоде, в процессе разработки и реализации проектов рекультивации и ликвидации несанкционированных свалок.

Список литературы

1. Информационный бюллетень о состоянии недр на территории Воронежской области за 2014 год. Вып. 20. Воронеж: ТЦ «Воронежгеомониторинг», 2015. 171 с.
2. Территориальная схема обращения с отходами на территории Воронежской области, утв. приказом департамента природных ресурсов и экологии Воронежской области от 26.08.2016 № 356 (в ред. приказа департамента природных ресурсов и экологии Воронежской области от 17.06.2021 № 299). [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/453149000> (дата обращения: 07.11.2022).
3. Росприроднадзор. Информация об образовании, обработке, утилизации, обезвреживании, размещении отходов производства и потребления. [Электронный ресурс]. URL: <https://vm.rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/production-consumption-waste/> (дата обращения: 07.11.2022).
4. Ашихмина Т.В. Геоэкологический анализ состояния окружающей среды и природоохранные рекомендации в районе расположения полигонов ТБО Воронежской области: дис. ... канд. геогр. наук. Москва, 2014. 136 с.
5. Алешина Т.А. Геоэкологическое моделирование воздействий биогаза полигонов твердых бытовых отходов на окружающую среду: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2011. 129 с.
6. Исаев С.В. Концепция природно-технических систем и ее использование при изучении антропогенной трансформации природной среды // Географический вестник. 2016. № 3 (38). С. 105–113.
7. Лонгобарди А., Елизарьев А.Н., Насырова Э.С. и др. Распространение свалочного фильтрата в грунтовые воды // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 2. С. 36–43.
8. Романова Э.П. Геоэкологическое состояние природно-антропогенных систем Европы // Вестник Московского университета. Серия География. 2012. № 2. С. 19–25.
9. Инструкция по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов для твердых бытовых отходов (утв. Минстроем России 02.11.1996). [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200006959> (дата обращения: 10.02.2022).
10. СП 320.1325800.2017 Полигоны для твердых коммунальных отходов. Проектирование, эксплуатация и рекультивация. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/556610331> (дата обращения: 12.02.2022).
11. Ashikhmina T.V., Ovchinnikova T.V., Kuprienko P.S., Ashikhmin A.M. Geoeological features of solid municipal waste storage facilities placement in Voronezh region // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2020. № 6 (16) (2). С. 254–264.
12. Ашихмина Т.В., Филатова А.И. Вопросы геоэкологической безопасности полигонов твердых коммунальных отходов на территории Воронежской области // Сборник избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ «Нацразвитие» (Санкт-Петербург, 27–31 августа 2019 г.). СПб.: Частное научно-образовательное учреждение дополнительного профессионального образования Гуманитарный национальный исследовательский институт «НАЦРАЗВИТИЕ», 2019. С. 107–110.

УДК 911:599.735.31

**ПОЛОВАЯ СТРУКТУРА ПОПУЛЯЦИИ
КАВКАЗСКОГО БЛАГОРОДНОГО ОЛЕНЯ
(*CERVUS ELAPHUS MARAL* OGILBY, 1840)
НА ПОЛУОСТРОВЕ АБРАУ (СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ КАВКАЗ)**

¹Быхалова О.Н., ²Кудактин А.Н.

¹ФГБУ «Государственный заповедник «Утриш»», Анапа, e-mail: bykhalovao@mail.ru;

²ФГБУ «Кавказский биосферный заповедник им. Х.Г. Шапошникова», Сочи,
e-mail: kudaktinkavkaz@mail.ru

Фактическая численность благородного оленя на территории Краснодарского края намного ниже оптимального уровня. О существенных недостатках управления ресурсами этого ценного промыслового вида свидетельствует низкий уровень годового прироста. Достоверные современные данные о структуре популяции вида в охотничьих угодьях края отсутствуют, имеются только сведения для федеральных ООПТ. Для анализа половой структуры популяции заповедника Утриш использовали данные визуальных наблюдений, встреч животных 2011–2012 гг., локаций фотоловушек в 2013–2021 гг. За десятилетний период в демографической структуре популяции произошли изменения полового состава и третичного соотношения полов. На первоначальном этапе выхода популяции из состояния угнетения, в условиях с плотностью популяции ниже оптимальной, общая доля самок превышает долю самцов, однако доля половозрелых самцов преобладает над долей репродуктивных самок. Третичное соотношение полов смещено в сторону преобладания самцов. При достижении плотности популяции оптимального значения общая доля самцов и самок уравнивается, доля половозрелых самцов превышает долю репродуктивных самок, доля молодняка снижается, темп роста популяции замедляется. В стабильном состоянии, с плотностью популяции несколько выше оптимальной, соотношение полов достигает уровня слабо промышляемой популяции 1:2, с преобладанием самок. Преобладание самок обеспечивает интенсивный рост численности популяции, увеличивая долю молодняка до трети в популяции. Гомеостаз популяции поддерживается механизмом регуляции плотности путем изменения половой структуры.

Ключевые слова: кавказский благородный олень, популяция, популяционный гомеостаз, плотность популяции, половая структура, третичное соотношение полов, заповедник Утриш, Северо-Западный Кавказ

**SEXUAL STRUCTURE OF THE CAUCASIAN RED DEER
(*CERVUS ELAPHUS MARAL* OGILBY, 1840)
POPULATION ON THE ABRAU PENINSULA (NORTHWEST CAUCASUS)**

¹Bykhalova O.N., ²Kudaktin A.N.

¹State Nature Reserve «Utrish», Anapa, e-mail: bykhalovao@mail.ru;

²Caucasian Biosphere Reserve named after A.I. H.G. Shaposhnikov, Sochi,
e-mail: kudaktinkavkaz@mail.ru

The number of red deer in the Krasnodar Territory is much lower than the optimal level. Significant shortcomings in resource management of this valuable commercial species are evidenced by the low level of annual growth. There are no reliable modern data on the structure of the species population in the hunting grounds of the region, there are only data for federal protected areas. To analyze the sex structure of the population of the Utrish Reserve, we used data from visual observations, animal encounters in 2011–2012, camera trap locations in 2013–2021. Over a ten-year period, changes in the sex composition and tertiary sex ratio occurred in the demographic structure of the population. At the initial stage of the exit of the population from the state of oppression, under conditions with population density below the optimum, the total proportion of females exceeds the proportion of males, but the proportion of mature males prevails over the proportion of reproductive females. The tertiary sex ratio is biased towards male dominance. When the population density reaches the optimal value, the total proportion of males and females is balanced, the proportion of mature males exceeds the proportion of reproductive females, the proportion of young animals decreases, and the population growth rate slows down. In a stable state, with a slightly higher than optimal population density, the sex ratio reaches the level of a poorly exploited population of 1:2, with a predominance of females. The predominance of females ensures intensive growth in the population, increasing the proportion of young animals to a third in the population. Population homeostasis is maintained by the mechanism of density regulation by changing the sexual structure.

Keywords: caucasian red deer, population, population homeostasis, sexual structure, tertiary sex ratio, population density, Utrish Reserve, Northwestern Caucasus

Способность популяции поддерживать устойчивое динамическое равновесие в изменяющихся условиях среды Ф. Клементс (1949) определил как гомеостаз популяции. При всем многообразии механизмов популяционного гомеостаза И.А. Шилов (1997) группирует их в три функциональные ка-

тегории: 1) поддержание пространственной структуры; 2) поддержание генетической структуры; 3) регуляция численности и плотности населения. Важное место в регуляции численности животных и сохранении биологического разнообразия занимает половая и возрастная структура, анализ ко-

торой позволяет прогнозировать ее численность на ближайший ряд поколений и лет. Структура популяции формируется, с одной стороны, на основе общих биологических свойств вида, с другой – под влиянием факторов среды, то есть имеет приспособительный характер [1].

Под половой структурой (половым составом) популяции обычно понимают соотношение (в %) особей мужского и женского пола [2]. Различают первичное, вторичное и третичное соотношение полов: первичное – при формировании половых клеток (гамет), вторичное – при рождении среди новорожденных особей, третичное – при половом созревании соотношение взрослых особей, участвующих в размножении [1]. Эволюционная теория пола (или гипотеза специализации полов) В.А. Геодакяна (1991) объясняет количественное соотношение полов. Поскольку на разных этапах эволюции, а также в различных условиях среды требуется разная эволюционная пластичность популяции, то для каждого из них существует свое определенное оптимальное значение третичного соотношения полов, не обязательно равное 1:1. Самцы ответственны за качество, самки – за количество потомства. Механизмы адаптации к изменяющимся условиям окружающей среды эволюционно заложены в физиологических особенностях самцов, обладающих повышенной чувствительностью к изменяющимся условиям внешней среды и узкой нормой реакции [3]. При этом выживает лишь часть мужских особей, но зато обладающих качествами, необходимыми для жизни в новых условиях. Быстрое распространение вновь приобретенных признаков обеспечивается полигамией самцов. Генетический поток информации (от поколения к поколению) о распределении генотипов в популяции больше реализует женский пол, а экологический поток (от среды к потомству) – мужской. В соответствии с теорией, мужской пол выступает буферной периферической авангардной частью, защитной зоной вокруг женского устойчивого, инерционного, золотого ядра популяции, представленного самками, обладающими более широкой нормой реакции. Однако, если нет угрозы от среды, то и потребность в защите отпадает сама собой.

Согласно экологическому правилу дифференциации полов [3], соотношение полов, дисперсия полов и половой диморфизм – основные характеристики раздельнополой популяции – переменные, регулируемые величины, тесно связанные с условиями сре-

ды и эволюционной пластичностью вида. Чем больше эти характеристики, тем выше пластичность, и наоборот. В стабильных условиях (оптимальная среда) они уменьшаются, а в изменчивых условиях (экстремальная среда) растут.

В.Н. Большаков и Б.С. Кубанцев (1984), обобщив материал по особенностям половой структуры популяций млекопитающих, выделяют четыре типа динамики половой структуры. Первый – с неустойчивым половым составом популяции в разных местообитаниях, в относительно короткие промежутки времени. Второй – с преобладанием самцов на фоне колеблющегося полового состава. Третий – с преобладанием самок в третичной структуре на фоне примерно равного соотношения полов во вторичной структуре. Четвертый – с относительным постоянством полового состава при относительно равном соотношении самцов и самок. Для оленя благородного характерен третий тип динамики половой структуры.

На территории России А.А. Данилкин (1999) считает нормальным половой состав от 1:1 до 1:1,5. На заповедных территориях и в районах с низким уровнем промысла соотношение полов в популяции близко 1:1 – 1,5, в пантовых хозяйствах – от 1:3 – 5 до 1:25 – 35. В районах, где проводится интенсивная трофейная охота, самцов в 2–7 раз меньше, чем самок. На Кавказе, в Кавказском биосферном заповеднике, по данным В.Н. Александрова (1968), самки и самцы кавказского благородного оленя способны к размножению на втором году жизни, однако полного развития самки достигают лишь к 3-летнему возрасту, а самцы – к 4–5-летнему. По его данным, в 1966 г. вторичное соотношение полов (у эмбрионов и новорожденных) было 1:0,7, а третичное – 1:2, а процентная доля самцов, самок и молодняка – 27,8%, 58,2%, 14% соответственно. С увеличением плотности в популяции уменьшается относительное количество половозрелых самцов и увеличивается количество самок. Автор объясняет это тем, что доля взрослых самцов в популяции уменьшается из-за повышения их гибели в период гона и откочевки. По результатам исследований конца XX в., в 1980 г. оптимальной демографической структурой популяции считалось зафиксированное соотношение групп: самцы – 35%, самки – 55%, сеголетки – 10%, при соотношении полов :1,6. К началу XXI в., в 2012 г., соотношение групп изменилось: 51:43:6, в 2015 г. соотношение полов – 1:1,21 [4, 5].

На территории Краснодарского края фактическая численность благородного оленя намного ниже оптимального уровня [6]. Низкий уровень годового прироста поголовья свидетельствует о существенных недостатках управления ресурсами этого ценного промыслового вида. Достоверные данные о структуре популяции оленей имеются только для федеральных ООПТ, занимающих около 5% общей площади края, где обитает около 41% общей численности вида. Для выработки стратегии охраны, рационального использования ресурсов и принятия обоснованных решений в Краснодарском крае необходима актуальная информация по основным эколого-популяционным характеристикам вида.

В заповеднике Утриш, на полуострове Абрау (Северо-Западный Кавказ) малочисленная изолированная популяция кавказского благородного оленя на протяжении 10 лет с момента организации заповедника (2011 г.) прошла этап восстановления от состояния угнетения до уровня «жизнеспособной популяции» [7].

Цель работы: анализ динамики половой структуры изолированной немногочисленной популяции кавказского благородного оленя (*Cervus elaphus maral* Ogilby, 1840) заповедника Утриш в период выхода из состояния угнетения до порога «жизнеспособной популяции».

Материал и методы исследования

Для анализа половой структуры популяции использовали результаты учета на реву, визуальных наблюдений, встреч животных, локаций фотоловушек.

В 2011–2012 гг. общую численность населения определяли по данным учета на реву, долю мужского, женского населения и молоди – по данным визуальных наблюдений (встреч) в период с августа по декабрь. Встреченные особи идентифицировались по внешним морфологическим признакам и наличию уникальных естественных меток. Всего было идентифицировано 28 особей. Повторы исключены.

В 2013–2021 гг. для подсчета общей численности, молодняка, мужской и женской доли населения, формирующих демографическую структуру популяции, брали выборку фотолокаций в период с августа по декабрь (около 31 000 фотоизображений). Это связано с тем, что в брачный период формируются гаремы, сопровождаемые самцами, которые, как правило, сохраняются в течение 3–4 месяцев. Для получения более точ-

ных сведений на фотографиях выделялись стадные группы по самцам, обладающим ярко выраженными индивидуальными отличиями. Затем самцы, самки, телята идентифицировались по комплексу признаков: морфологии, экстерьеру, конституции, наличию уникальных естественных меток. Фотоидентификация самцов по морфологическим признакам включала следующие параметры: строение рогов, размеры тела, окраска шерстного покрова, пятнистость и др. В работе применялись апробированные методики исследования общего строения и терминальной части рогов А.А. Фандеева и В.П. Никольской (1978), проксимальной части рогов А.Н. Кудактина, О.Н. Быхаловой (2019). По результатам фотоидентификации составлен каталог оленей по годам (общая численность, самцы, самки, молодняк). Всего идентифицировано 475 особей.

Плотность популяции определяли как число особей в расчете на 1000 га площади территории заповедника.

Половой состав рассчитывали путем соотношения групп (в%) самцов, самок и сеголеток.

Третичное соотношение полов вычисляли как соотношение общего количества (в%) взрослых половозрелых самцов и самок.

Демографическую структуру популяции рассматривали как численное соотношение (в%) следующих половозрастных групп в составе населения: взрослые самцы, молодые самцы, взрослые самки, молодые самки, сеголетки. Взрослые самцы – половозрелые самцы, старше 2 лет, имеющие рога с 2 и более отростками. Молодые самцы (спичаки) – самцы возраста 1–2 лет, имеющие рога с одним отростком. Взрослые самки – репродуктивные самки с телятами. Молодые самки (яловые) – оленухи, старше 1 года, не имеющие телят. Сеголетки (молодняк) – телята текущего года, особи неопределенного пола.

Результаты исследования и их обсуждение

Демографическая структура популяции

Анализ половой структуры популяции кавказского благородного оленя заповедника Утриш позволил проследить происходящие изменения (таблица). Процентное соотношение самцов, самок, молодняка в 2013–2021 гг. варьировало от 36:44:20 до 24:47:29. На фоне увеличения доли самок на 7% и телят на 45% происходит уменьшение доли самцов на треть (33%).

Половой состав и третичное соотношение полов в популяции
кавказского благородного оленя заповедника Утриш
в 2011–2021 гг. (по данным фотоловушек)

Учетный период, год	Плотность популяции, ос./1000 га	Самцы, %			Самки, %			Сеголетки	Третичное соотношение полов, половозрелых самцов %: самок: %
		Общее количество	Взрослые	Спичаки	Общее количество	Самки с телятами	Яловые		
2011*	1,5	46	46	0	54	0	–	0	–
2012*	1,7	47	40	7	53	0	–	0	–
2013	2,8	36	24	12	44	20	24	20	1:0,8
2014	4,2	38	30	8	41	22	19	21	1:0,7
2015	5,1	44	38	6	42	13	29	14	1:0,4
2016	5,2	43	28	15	43	13	30	14	1:0,5
2017	6,2	45	31	14	35	20	15	20	1:0,6
2018	4,2	51	38	13	32	16	16	17	1:0,4
2019	11,3	35	30	5	41	24	17	24	1:0,8
2020	8,4	31	18	13	43	26	17	26	1:1,5
2021	8,5	24	15	9	47	29	18	29	1:2,0

Примечание: * – визуальные встречи животных.

Доля самцов в популяции на момент организации заповедника в 2011–2012 гг. была в пределах 46–47%. В 2013 г. она снижается до 36%, а в 2014–2018 гг. увеличивается до 51%. Позже, в 2019 г., она вновь уменьшается на треть, и эта тенденция сохраняется до 2021 г.: от 35% до 24%. В 2016 г. в популяции соотношение полов выравнивается. Отмечено увеличение количества взрослых самцов, половозрелых старше 2 лет, с 2013 г. по 2015 г. от 24% до 38%, а в 2016 г. – снижение до 28%, в 2017–2018 гг. их вновь больше – 38%, но в 2019–2021 гг. меньше в 2 раза – от 30% до 15%. Доля молодых самцов (спичаков) в 2013 г. достигает 12%, затем в 2014–2015 гг. снижается до 6%. В 2016 г. она вновь увеличивается в 2,5 раза и до 2018 г. находится в пределах 15–13%, в 2019 г. снижается до 5%, в 2020 г. возрастает до 13%, в 2021 г. снижается до 9%.

Доля самок в 2011–2012 гг. снижается от 54% до 53%, в 2013–2016 г. находится в пределах 44–41%. В 2017, 2018 гг. доля самок составляет 35% и 32% соответственно. С 2019 г. по 2021 г. доля самок увеличивается от 41% до 47%. Среди женских особей доля взрослых половозрелых самок в 2013–2014 г. составляет 20–22%. В 2015–2016 гг. она снижается и держится в пределах 13%, в 2017 г. возрастает до 20%, в 2018 г. сни-

жается до 16%, в 2019–2021 гг. доля оленух с телятами возрастает с 24% до 30%.

Третичное соотношение полов

На этапе становления популяции в течение 10 лет третичное соотношение полов изменяется в сторону преобладания половозрелых самок и уменьшения взрослых самцов. В 2013–2015 гг., несмотря на доминирование самок, доля половозрелых самцов увеличивается, а репродуктивных самок снижается, соотношение полов изменяется от 1:0,8 до 1:0,4. В 2016–2017 гг. наблюдается рост численности половозрелых самцов, соотношение полов достигает 1:0,5–0,6. В 2018 г. доля половозрелых самок вновь снижается до 1:0,4, в 2019 г. увеличивается в 2 раза до соотношения 1:0,8. В 2021 г. соотношение полов достигает 1:2.

Третичное соотношение полов в популяции заповедника в 2013–2019 гг. составляет 1:0,8–0,4 и соответствует уровню промысловых популяций. В 2020–2021 гг. оно достигает соотношения 1:1,5–2, характерного для слабо промышляемой или охраняемой популяции [8, 9] (Александров, 1969; Данилкин, 1999).

По данным В.Н. Александрова (1969) и С.А. Трепета (2014, 2017), в Кавказском

заповеднике процентная доля самцов, самок и сеголеток в 1968 г., 1980 г., 2012 г. была: 27,8:58,2:14, 35:55:10, 51:43:6 соответственно, а третичное соотношение полов – 1:2, 1:1,6, 1:1,21. За оптимальный был принят половой состав, установленный в 1980 г.: 35:55:10, при соотношении полов 1:1,6. В популяции на фоне преобладания самцов с 1968 г. по 2015 г. наблюдается снижение доли самок на 26% и молодняка в 2,3 раза.

Анализ структуры популяции кавказского благородного оленя в Азербайджане по состоянию на 2011 г. выявил общее соотношение полов как 1:1,2, а разного возраста – 44,4:52,3:3,3 с общим преобладанием самок [10]. Низкая доля молодняка может свидетельствовать о замедлении скорости роста популяции и выходе ее численности на стационарный уровень.

Е.Е. Сыроечковский (1986) для дико-северного оленя определял оптимальную структуру популяции: взрослые самцы – 15–18%, взрослые самки – 38–42%, годовалые особи – 20–22% и сеголетки – 23–26%.

К концу 2021 г. в популяции кавказского благородного оленя заповедника Утриш сформировалась следующая демографическая структура: взрослые самцы – 15%, взрослые самки – 29%, спичаки – 9%, яловые самки – 18%, сеголетки – 29%, при соотношении самцов, самок, сеголеток – 24:47:29 соответственно, а третичное соотношение полов – 1:2. В сравнении с Кавказским заповедником (2012) в заповеднике Утриш доля самцов на 112% ниже, самок – на 9% выше, молодняка – практически в 5 раз больше. При сопоставлении со структурой популяции Азербайджана в заповеднике Утриш доля самцов меньше на 85%, самок – меньше на 11%, молодняка – почти в 9 раз больше.

Для кавказского благородного оленя заповедника Утриш характерна плотность от 2 до 8 ос./1000 га, хозяйственно-целесообразная (оптимальная) – 5 ос./1000 га [7].

При сопоставлении плотности популяции и третичного соотношения полов в развитии половой структуры можно выделить 3 этапа: 1-й этап – плотность популяции ниже оптимума в 2011–2014 гг., 2-й этап – плотность популяции в пределах оптимума в 2015–2016 гг., 3-й этап – плотность популяции выше оптимума в 2017–2021 гг.

На первоначальном этапе выхода популяции из состояния угнетения, в условиях с плотностью популяции ниже оптимальной в 2–3 раза, в 2011–2014 гг. общая доля самок превышает долю самцов на 7–18%,

однако доля половозрелых самцов преобладает над долей репродуктивных самок на 20–36%. Третичное соотношение полов смещено в сторону преобладания самцов. Доля молодняка – 21%. Значительная доля молодых особей на этой стадии может свидетельствовать об увеличении популяции с высоким темпом роста.

В 2015–2016 гг. плотность популяции увеличивается в 2 раза и достигает оптимального значения, общая доля самцов и самок уравнивается. Число половозрелых самцов превышает долю репродуктивных самок в 2,5–3 раза, а доля молодняка снижается на 30%, достигая 14%, и держится в течение 2 лет. Темп роста популяции замедляется.

В 2017 г. плотность популяции превышает оптимальное значение на 24%, а общая доля самцов превышает общую долю самок на 28%. Количество половозрелых самцов превышает число половозрелых самок на 55%. Доля молодняка – 20%. Темп роста популяции повышается, часть оленей начинает откочевывать за территорию заповедника [7]. В 2018 г. плотность популяции ниже оптимума на 20%. Из заповедника продолжается откочевка животных. Случаев падежа оленей не отмечается. Общая доля самцов преобладает над общей долей самок на 59%, число половозрелых самцов превышает долю репродуктивных самок в 2,4 раза, а доля молодняка снижается до 17%. В 2019 г. плотность популяции превышает оптимум в 2,6 раза, общая доля самок превышает общую долю самцов на 17%, при этом половозрелых самцов на 25% больше чем репродуктивных самок. Доля сеголеток увеличивается на 41% относительно предыдущего года. В 2019 г. выпало осадков 467 мм, в 2020 г. – 442 мм при годовой норме 569 мм, что соответствует двухлетнему сезону засухи. В это время в популяции наблюдаются признаки перенаселения. В 2020 г. плотность популяции превышает оптимум на 68%, но ниже предыдущего года на 25%. Общая доля самцов меньше общей доли самок на 38%. Доля половозрелых самцов меньше доли репродуктивных самок на 44%. Доля сеголеток – 26%. В 2021 г. плотность популяции превышает оптимум на 68%, т.е. остается на уровне предыдущего года, хотя общее число самцов практически в 2 раза меньше числа самок. Доля половозрелых самцов в 2 раза меньше доли репродуктивных самок. Сеголетки составляют треть популяции (29%). Преобладание самок обеспечивает интенсивный

рост общей численности, увеличивая долю молодняка до трети в популяции.

Значительную долю молодняка и преобладание доли половозрелых самцов над репродуктивными самками в состоянии угнетения мы объясняем проявлением механизмов популяционного гомеостаза, что согласуется с гипотезой С.С. Шварца (1976), когда существенное снижение численности популяции при сохранении ее оптимальной структуры ведет к мобилизации экологического резерва для восстановления численности на уровне популяции. В соответствии с экологическим правилом дифференциации полов В.А. Геодакяна (1991), в экстремальных условиях, при изменчивой среде увеличивается соотношение полов, доля мужского населения растет, повышается эволюционная пластичность популяции, происходит ее быстрая адаптация.

Л.А. Колпашиков (2000) в результате многолетних исследований таймырской популяции дикого северного оленя выявил, что при стабильном интенсивном промысле рождалось больше самцов, вторичное соотношение полов – 1:0,9.

В исследованиях биологических особенностей популяции сайгака Северо-Западного Прикаспия группы ученых (Т.Ю. Каримова и др. (2020)) показано, что при низкой численности популяции самцов в популяции рождается немного больше, чем самок, – 1:0,9.

Путем многолетних наблюдений популяции благородного оленя из районов Нижней Австрии обнаружено, что с ростом плотности популяции увеличивается доля самок среди телят [11].

В условиях переуплотнения популяции и дефицита кормов во время засухи в популяции заповедника Утриш включаются механизмы популяционного гомеостаза, которые приводят к стабилизации состояния популяции. В половой структуре происходят изменения третичного соотношения полов в сторону преобладания доли половозрелых самок.

Согласно гипотезе поведенческой регуляции численности популяции Кристиана–Дейвиса, разработанной Дж. Кристианом (1950, 1968) и Д. Дейвисом (1964), регуляция численности осуществляется механизмами социального стресса, возникающего при повышении плотности вследствие усиления конкуренции за индивидуальные участки, пищу, самок и иное, опосредуемыми нейроэндокринными

воздействиями на репродукцию, иммунную резистентность, дезадаптацию к хроническому стрессу.

В стабильном состоянии, с плотностью популяции несколько выше оптимальной, соотношение полов достигает уровня слабо опромышляемой популяции 1:2, с преобладанием самок. Согласно гипотезе Геодакяна, в стабильной среде потребность в мужском поле, несущем экологический поток информации, отсутствует, эволюционная пластичность популяции снижается. Актуальной становится реализация генетического потока информации, которую выполняют самки. Самки обеспечивают требуемое количество потомства и стабильность видовых качеств независимо от условий существования [12, 13].

Заключение

Для малочисленной изолированной популяции кавказского благородного оленя заповедника Утриш выявлены некоторые особенности половой структуры.

Демографическая структура популяции соответствует оптимальному соотношению полов слабо опромышляемой популяции: взрослые самцы – 15%, взрослые самки – 29%, спичаки – 9%, яловые самки – 18%, сеголетки – 29; соотношение самцов, самок, сеголеток – 24:47:29, третичное соотношение полов – 1:2. Значительная доля молодежи показывает устойчивое воспроизводство, прогрессирующее состояние быстро растущей популяции.

В течение 10 лет в динамике структуры популяции происходят изменения от увеличения соотношения полов и экологической пластичности в сторону их уменьшения.

Восстановление популяции, выход из угнетения, переход к стабильному состоянию «жизнеспособной популяции» проходят в несколько этапов и зависят от плотности популяции. Сначала, при плотности популяции ниже оптимума, формируется самцовая часть населения популяции, обеспечивающая адаптацию популяции к изменяющимся условиям окружающей среды. Третичное половое соотношение смещено в сторону преобладания доли самцов. Этот период занял около 7 лет.

Затем, по достижении оптимальных значений плотности популяции, стабильного состояния, развивается женское ядро популяции. В половой структуре третичное соотношение полов смещается в сторону преобладания самок.

Изменения половой структуры популяции обеспечивают регуляцию ее плотности, поддерживая популяционный гомеостаз в изменяющихся условиях окружающей среды.

Список литературы

1. Колесников С.И. Экология. М.: Дашков и К., 2017. 384 с.
2. Гальперин М.В. Общая экология. М.: ФОРУМ, 2019. 336 с.
3. Геодакян В.А. Эволюционная теория поля // Природа. 1991. № 8. С. 60-69.
4. Трепет С.А. Копытные Северо-Западного Кавказа: современное состояние и механизмы устойчивости популяций. Краснодар: Кубанское книжное издательство (издатель И.А. Богров), 2014. 152 с.
5. Трепет С.А., Ескина Т.Г., Бибина К.В. Особенности динамики популяций копытных в Кавказском заповеднике в 2014-2017 годах // Труды Кавказского государственного природного биосферного заповедника. Вып. 23. Майкоп: Качество, 2018. С. 58-70.
6. Быхалова О. Н., Кудактин А. Н. Современное состояние популяции благородного оленя (*Cervus elaphus*) в Краснодарском крае // Сохранение разнообразия животных и охотничье хозяйство России: материалы 9-й Международной научно-практической конференции (Москва, 18-19 февраля 2021г.). М.: ЛАРГО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2022. С. 212-213.
7. Быхалова О.Н., Кудактин А.Н. О метапопуляции кавказского благородного оленя (*Cervus elaphus maral* Ogilby, 1840) на полуострове Абрау // Наземные и морские экосистемы полуострова Абрау: история, состояние, охрана. Научные труды. Т. 5. Анапа. 2021. С. 145-153.
8. Александров В.Н. Экология кавказского оленя // Труды Кавказского государственного заповедника. Вып. 10. М., 1968. С. 95-200.
9. Данилкин А.А. Олени (Cervidae). Млекопитающие России и сопредельных регионов. М.: ГЕОС, 1999. 600 с.
10. Кулиев С.М. Олени Азербайджана (Artiodactyla: Cervidae): монография. Германия: LAP LAMBERT Acad. Publ., 2016. 216 с.
11. Vetter S.G., Arnold W. Effects of population structure and density on calf sex ratio in red deer (*Cervus elaphus*) – implications for management. *European Journal of Wildlife Research*. 2018. Vol. 64. No. 30. P. 1-12. DOI: 10.1007/s10344-018-1190-1.
12. Вайнер Э.Н. Валеология: учебник для вузов. М.: Флинта: Наука, 2013. 445 с.
13. Геодакян С.В. Два пола. Зачем и почему? Эволюционная теория пола В.А. Геодакяна. М., 2012. 252 с.

УДК 528.8:332.332:631.1

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ И ГИС В ОЦЕНКЕ ЛЕСОЗАРАСТАНИЯ НЕИСПОЛЬЗУЕМЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ

Габитова А.А., Галеев Э.И., Одинцов Г.Е., Тагиров В.В., Янбаев Ю.А.

ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет», Уфа,

e-mail: abigabi@yandex.ru

В Республике Башкортостан, как и во многих других регионах России, в настоящее время часть неиспользуемых земель интенсивно зарастает древесно-кустарниковой растительностью (в первую очередь, пастбища и сенокосы). При этом возникает необходимость оценки степени запущенности этого процесса и проведения для этого масштабных и затратных полевых работ. Геоинформационные технологии могут обеспечить применение программно-технических средств обработки, передачи и анализа информации при решении данной проблемы путем планирования рационального использования агролесоландшафтов. В работе представлены результаты исследования зарастания неиспользуемых сельскохозяйственных земель в Республике Башкортостан подростом сосны обыкновенной с применением квадрокоптера, сервиса DroneDeploy и анализа космических снимков со спутника Sentinel-2. На исследованной территории в 240 га значения нормализованного относительного индекса растительности (NDVI) варьировались в пределах от 0,28 до 0,67, что свидетельствует как об относительно большом нарастании растительной биомассы, так и ее высокой пространственной неоднородности, это определяется прежним режимом использования земель, временем выведения из сельскохозяйственного оборота и близостью к насаждениям – источникам поступления семян. Анализ процессов, протекающих в лесах как на глобальном, так и на местном уровне, позволяет выполнить геоинформационные исследования. Тщательный контроль и постоянный мониторинг максимально эффективно достигаются посредством технологии дистанционного зондирования. С целью отслеживания динамики растительного покрова применяют довольно популярные, информативные и апробированные методы дистанционного зондирования Земли из космоса. Такой комплексный подход, компиляция современных методов и технологий предоставляют науке и ученым совершенно новые возможности исследования состояния объектов природы.

Ключевые слова: лесовосстановление, географическая информационная система, мониторинг, дистанционное зондирование

REMOTE SENSING AND GIS IN THE ASSESSMENT OF REFORESTATION OF UNUSED AGRICULTURAL LANDS

Gabitova A.A., Galeev E.I., Odintsov G.E., Tagirov G.E., Yanbaev Yu.A.

Bashkir State Agrarian University, Ufa, e-mail: abigabi@yandex.ru

A part of the unused lands of the Republic of Bashkortostan, as well as many other regions of Russia, is intensively overgrown with woody and shrubby vegetation at the present time (primarily pastures and hayfields). The need to assess the degree of neglect of this process and conduct large-scale and costly field work often arises. Geoinformation technologies can ensure the use of software and hardware for processing, transmitting and analyzing information in solving this problem by planning the rational use of agroforestry landscapes. The work presents the results of Scots pine undergrowth in unused agricultural lands study in the Republic of Bashkortostan using a quadcopter, the DroneDeploy service and satellite imagery analysis. The values of the normalized relative vegetation index (NDVI) ranged from 0.28 to 0.67 in the studied area of 240 hectares. This indicates both a relatively large increase in plant biomass and its high spatial heterogeneity, which is determined by the previous regime of land use, the time of withdrawal from agricultural farming and proximity to stands – sources of seed's flow. Geoinformation technologies provide an excellent opportunity to analyze the processes occurring in forests at the local or global level. Remote sensing technologies allow you to monitor and constantly monitor the state of forests. Methods of remote sensing of the Earth from space are widely used to monitor the dynamics of vegetation cover. In this regard, fundamentally new opportunities are opening up for studying the state of natural objects, including forests and when planning agroforestry landscapes.

Keywords: reforestation, geographic information system, monitoring, remote sensing

В период с 2010 по 2018 г. общая площадь земель сельскохозяйственного назначения в Российской Федерации сократилась на 17,5 млн га, согласно данным Росреестра. В 2018 году решениями органов государственной власти Российской Федерации, субъектов и местного самоуправления из земель сельскохозяйственного назначения в лесной фонд было переведено 647,8 тыс. га [1].

В Республике Башкортостан, одном из ведущих сельскохозяйственных регионов России, по состоянию на 1 января 2020 г. насчитывается 7265,9 тыс. га земель сельскохозяйственного назначения [2]. Как и на других территориях [3-5], сенокосные и пастбищные угодья (2345,3 и 1274,9 тыс. га соответственно) в настоящее время интенсивно зарастают древесно-кустарниковой растительностью. При этом часто возникает

проблема нерентабельности рекультивационных работ в них из-за длительности лесозарастания, и, следовательно, возрастает актуальность проведения масштабных и затратных полевых работ по оценке степени лесозарастания неиспользуемых сельскохозяйственных земель [6].

Анализ картографических изображений с использованием современных географических информационных систем (ГИС) является в настоящее время популярным альтернативным способом оперативного получения и передачи сведений о состоянии лесоаграрных ландшафтов [7]. Функциональные возможности ГИС на всех этапах мониторинга (сбор, передача, обработка, анализ, хранение и документирование) процессов в этих антропогенно измененных экосистемах реализуются в основном в камеральных условиях, сокращая тем самым время и расходы на полевые работы, одновременно повышая точность и полноту получаемой информации. Этим обеспечивается основа для оптимизации ведения сельского хозяйства, смягчения последствий экстремальных погодных явлений, частота и выраженность которых усиливается в условиях изменяющегося климата [8]. Особенно важным приложением использования ГИС-технологий является оценка динамики зарастания древесно-кустарниковой растительностью неиспользуемых земель сельскохозяйственного назначения. Мониторинг этого явления позволит оценить масштаб этого процесса, разработать меры по возвращению земель в сельскохозяйственный оборот и, при их экономической нецелесообразности, изменить структуру земельного фонда [9].

Целью исследования является анализ лесорастительного покрова неиспользуемых сельскохозяйственных земель с использованием нормализованного относительного индекса растительности (далее NDVI), который определяется в ходе дистанционного зондирования земли [8; 10; 11] и обработки данных с помощью ГИС-технологий [12].

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- подобрать участок с использованием открытой базы данных космических снимков со спутника Sentinel;
- оценить степень зарастания исследуемого участка древесно-кустарниковой растительностью по обработанному космическому снимку.

Материал и методы исследования

Для проведения исследования нами выбрана сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) – так называемый вид-пионер, который в лесной и лесостепной зонах активно заселяет неиспользуемые сельскохозяйственные земли, в том числе в условиях Республики Башкортостан. Выбранный для изучения участок находится вблизи с. Ломовка Белорецкого района региона, здесь на месте бывших пашен и пастбищ наблюдается неравномерное, но местами обильное лесовозобновление древесных растений, преимущественно сосны обыкновенной (рис. 1).

Параметр (вычисляется как разница интенсивностей отраженного света в красном и инфракрасном диапазонах, деленная на сумму их интенсивностей) показывает количество фотосинтетически активной биомассы и варьируется от -1 (безлесная территория) до 1 [9; 13].



Рис. 1. Ортофотоплан изучаемой площади с подростом сосны обыкновенной

Диапазон со значениями 0,8-0,9 означает, что на большей части исследуемой территории преобладает густая и здоровая древесно-кустарниковая растительность, а анализируемый участок попадает в высокую категорию пригодности для ведения агролесоводства. Обследование выбранного участка было проведено с применением квадрокоптера DJI Terra с RGB-камерой. RGB и мультиспектральные изображения были обработаны для создания орто-изображений с высоким разрешением, богатой спектральной информацией с высокой плотностью точек. Сначала оптические изображения были зарегистрированы с использованием данных GPS, после чего совмещенные изображения были сшиты для создания ортомозаики с помощью сервиса DroneDeploy (<https://www.dronedeploy.com/>). Полученный ортофотоплан представлен на рисунке 1.

Преимущества проведения съёмки квадрокоптером заключаются в получении изображения исследуемого участка строго сверху с точной привязкой к координатам и в необходимый момент времени для исследований [14]. Также в этом исследовании использовался пространственный анализ с применением спутниковых снимков для оценки растительного покрова участка. Был использован космический снимок со спутника Sentinel-2, с облачным покровом на исследуемой площади <5%. При работе с дистанционными материалами необходимо учитывать, что они не могут полностью заменить полевые исследования, но их использование позволяет делать более масштабную, всестороннюю и глубокую оценку изменений природных объектов. С помощью методов ДЗЗ можно получить данные о динамике растительного покрова, об изменении его состава и устойчивости. Снимки с беспилотников позволяют определять состояние растений даже по цвету листьев, что может быть индикатором химического загрязнения воды, почвы и воздуха. С их помощью легко отследить нарушения почвенного покрова, развитие эрозионных процессов. Они информативны за счет большого спектра диапазонов и режимов съёмки; оперативны (бесплатные космические снимки появляются в общем доступе в течение первых суток, частота съёмки одного и того же квадрата – несколько дней, у разных спутников она варьирует); объективны (космический снимок имеет точное время съёмки, индивидуальный номер, его невозможно подделать, поскольку это лишь

копия из генеральной базы данных любого профильного агентства, и намеренное искажение информации всегда можно установить) [15].

Индекс растительности был проанализирован с использованием NDVI, в частности каналов 4 и 8. Формула выглядит следующим образом:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

$$NDVI = \frac{(Band8 - Band4)}{(Band8 + Band4)}$$

NDVI был получен путем расчета диапазонов ближнего инфракрасного (NIR) и красного света (RED). Основными этапами обработки данных изображений с использованием QGIS 3.16 были (1) сбор спутниковых данных, (2) предварительная обработка изображений, состоящая из компоновки каналов, создания мозаики и обрезки изображений до пространственного экстенда LEA, (3) данные географической привязки, (4) определение порога NDVI, затем (5) классификация растительности. Изучаемая площадь была выделена в отдельный слой – SHP-файл – для точечной обработки. Дата съёмки снимка – 03 июля 2022 г., зона UTM 40N, облачность 25%, сцена S2A_OPER_MSI_L2A_DS_ATOS_20220703T111912_S20220703T070634_N04.00, пространственное разрешение использованных каналов – 10 м.

К операциям предварительной обработки относятся те операции, которые предшествуют основному анализу. При сборе данных системами дистанционного зондирования используются приборы для регистрации интенсивности электромагнитной энергии, отраженной от поверхности Земли. В процессе сканирования, передачи и записи электромагнитная энергия проходит через сложные условия окружающей среды, которые влияют на качество записываемых данных. Записанные данные подвержены систематическим ошибкам, шумам и геометрическим искажениям, которые необходимо компенсировать, чтобы данные напоминали исходную сцену [16]. Перед обработкой основного анализа были проведены следующие две основные корректировки: 1) геометрическая коррекция, 2) атмосферная коррекция.

Чтобы данные изображения можно было интегрировать в существующую карту или использовать в качестве входных данных

для базы данных ГИС, их необходимо скорректировать, чтобы данные изображения соответствовали местной системе координат. Геометрическая коррекция включает в себя перемещение пикселя в двухмерном изображении из его исходного положения в желаемое картографическое положение. Это процесс преобразования координат изображения (x, y) в географические координаты (E, N) с использованием системы картографической проекции [16], так что положение каждого пикселя может быть связано с особенностями местности методом полиномиального преобразования первого порядка.

Атмосферная коррекция – это процесс преобразования значений яркости, измеренных на спутнике, в значения коэффициента отражения, как если бы они были измерены на поверхности. Этот метод осуществляется путем учета вклада атмосферных помех в спектральные значения изображения. Для исключения систематических ошибок и повышения качества данных дистанционного зондирования проведена радиометрическая коррекция с помощью инструмента «Tool Top of Atmosphere Reflectance» программы SAGA GIS. После радиометрической коррекции использовалась атмосферная коррекция для устранения эффектов рассеяния и поглощения атмосферой [16].

Для обработки спутниковых снимков использован программный пакет со свободной лицензией QGIS 3.16. Построение индексного изображения NDVI осуществлялось с помощью инструмента «Калькулятор растров».

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследования показали, что использованные технологии дистанционного зондирования обеспечивают быструю, экономичную и эффективную оценку состояния лесовозобновления изучаемого участка. Для территории площадью около 240 га в течение сравнительно короткого времени получены сведения о пространственном распределении растительной биомассы. Анализ NDVI (рис. 2) позволил отнести возобновление к 2 классу растительности. Это означает, что на изученной территории с древесно-кустарниковой растительностью растительная биомасса, представленная главным образом подростом сосны обыкновенной, в целом достигает сравнительно высоких величин. В то же время доказана ее существенная неоднородность в пространстве (значение показателя изменяется от 0,28 до 0,67) и во времени – наибольшие значения NDVI получены в частях территории с наибольшим возрастом подростка (временем его появления), что определяется прежним режимом использования земель (пашня, пастбища, неудобья), временем выведения из сельскохозяйственного оборота и близостью к насаждениям – источникам поступления семян. Более трудоемкие наземные полевые исследования, проведенных в сети 11 пробных площадок в целях определения густоты, состояния и возраста подростка, подтвердили эти заключения.

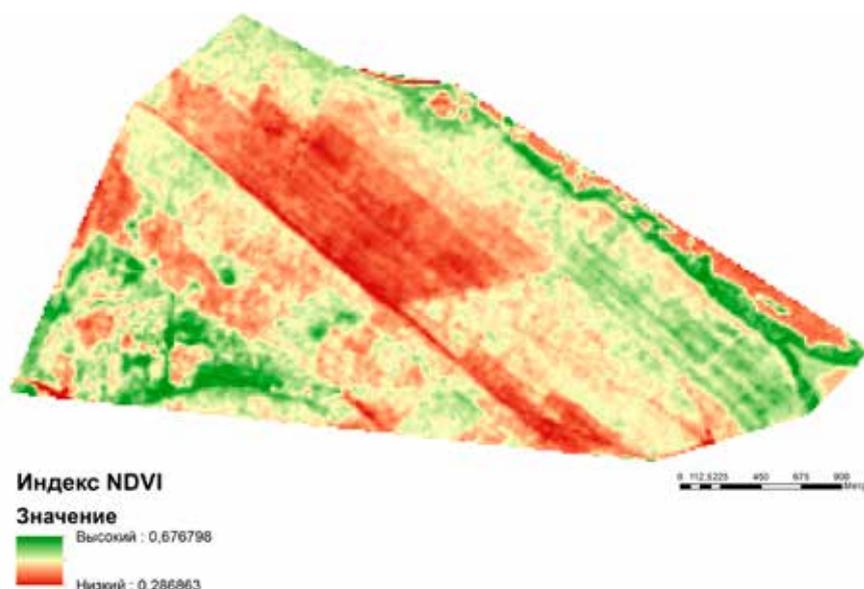


Рис. 2. Значения индекса NDVI на неосваиваемых сельскохозяйственных землях, зарастающих подростом сосны обыкновенной

Заключение

Актуальность проведения аналогичных работ с использованием ГИС-технологий в больших масштабах диктуется тем, что их результаты позволяют более обоснованно решать вопросы возврата зарастающих земель в сельскохозяйственный оборот путем проведения культурно-технических мероприятий (в случае нашего исследования, пример – участки с меньшими значениями NDVI).

Использование данных ДЗЗ- и ГИС-технологий позволяет провести оценку зарастания земель сельскохозяйственного назначения древесно-кустарниковой растительностью. Благодаря точечному анализу космического снимка со спутника Sentinel-2 удалось определить наличие древесно-кустарниковой растительности на изучаемой площади, что было подтверждено данными полевых исследований.

Если количество древесной биомассы делает рекультивационные меры чересчур затратными, возможно рассмотрение вопроса о переводе соответствующих площадей в категорию лесных земель. В настоящее время эти работы проводятся в относительно небольших масштабах. В частности, по данным Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, в 2020 г. из фонда перераспределения было переведено в земли лесного фонда лишь 76,7 тыс. га.

Список литературы

1. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан в 2019 году / Министерство природопользования и экологии Республики Башкортостан. Уфа, 2020. 286 с.
2. Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Республике Башкортостан в 2020 г. Уфа: Управление Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии по Республике Башкортостан, 2021. 230 с.
3. Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Губаев А.В., Лежнин С.А., Незамаев С.А., Александрова Т.А. Оценка зарастания земель запаса Республики Марий Эл лесной растительностью по спутниковым снимкам // Вестник МарГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование, 2010. Т. 2. № 9. С. 14-20.
4. Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Губаев А.В., Лежнин С.А. Использование космических снимков ALOS для выявления площадей бывших сельскохозяйственных угодий, зарастающих лесом // Геоматика. 2010. № 4. С. 68–72.
5. Новоселова Н.Н., Залесов С.В., Магасумова А.Г. Формирование древесной растительности на бывших сельскохозяйственных угодьях. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2016. 106 с.
6. Морозов А.М., Николаева И.О. Особенности лесообразовательного процесса на пашне и сенокосе // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2013. № 5. С. 82-86.
7. Кулик К.Н., Павловский Е.С., Рулев А.С., Юферев В.Г., Бакурова К.Б., Дорохина З.П., Тубалов А.А., Кошелев А.В., Березовикова О.Ю., Дзугаев А.Н. Методические указания по ландшафтноэкологическому профилированию при агролесомелиоративном картографировании. М.: Изд-во РАСХН, 2007. 42 с.
8. Hartoyo A., Sunkar A., Ramadani R. Normalized difference vegetation index (Ndvi) analysis for vegetation cover in leuser ecosystem area, Sumatra, Indonesia. Biodiversitas. 2021. 22(3). P. 160-1171. DOI: 10.13057/biodiv/d220311.
9. Zhu Y., Zhang J., Zhang Y., Qin S., Shao Y., Gao Y. Responses of Vegetation to Climatic Variations in the Desert Region of Northern China. Catena. 2019. № 175. P. 27–36. DOI: 10.1016/j.catena.2018.12.007.
10. Torquebiau E. Agroforestry and climate change. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.fao.org/climatechange/36110-0dff1bd456fb39dbcf4d3b211af5684e2.pdf>. (дата обращения: 25.11.2022).
11. Newaj R., Chavan S.B., Prasad R. Climate-smart agriculture with special reference to agroforestry. Indian J. of Agroforestry. 2015. № 17(1). P. 96-108.
12. Tong X. Trends in Vegetation and Their Responses to Climate and Topography in Northwest Guangxi. Shengtai Xuebao/Acta Ecologica Sinica. 2014. № 34 (12). P. 3425–3434. DOI: 10.5846/stxb201310162503.
13. Юферев В.Г., Кулик К.Н., Рулев А.С., Мушаева К.Б., Кошелев А.В., Дорохина З.П., Березовикова О.Ю. Геоинформационные технологии в агролесомелиорации. Волгоград: Изд-во ВНИАЛМИ, 2010. 102 с.
14. Рулев А.С., Юферев В.Г., Кошелев А.В., Ткаченко Н.А. Дистанционный мониторинг агролесоландшафтов с применением ГИС-технологий // Вестник Волгоградского государственного университета. Сер. 11. Естественные науки. 2013. № 1 (5). С. 51-58.
15. Чупаченко О.Н. Учебно-методическое пособие по проведению общественного мониторинга загрязнений рек при добыче россыпного золота с использованием космоснимков. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2020. 36 с.
16. Ratnayake R. Remote sensing and GIS application for monitoring forest management operations. 2004. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/44035125_Remote_sensing_and_GIS_application_for_monitoring_forest_management_operations. (дата обращения: 25.11.2022).

УДК 911.3

**ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭТНИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ
КОРЕННЫХ МАЛОЧИСЛЕННЫХ НАРОДОВ РОССИИ
(НА ПРИМЕРЕ ЯКУТИИ)**

Дегтева Ж.Ф.

*ФГБОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова», Якутск,
e-mail: degteva.z@bk.ru*

В статье представлено авторское видение проблем, с которыми сталкивается исследователь при определении этнических территорий коренных малочисленных народов России. Рассматриваются теоретические основы определения этнических территорий, анализируются региональные особенности освоения пространства народами. Акцентируется внимание на особый по ценностям и атрибутам уклад малочисленных народов. Обосновывается специальный подход к определению этнической территории коренных малочисленных народов. Автор в исследовании уделяет внимание математико-статистическим методам, которые могут быть использованы для выявления концентрации малочисленной этнической общности на территории. Описывает характерные особенности территорий традиционного природопользования Республики Саха (Якутия), статус и последовательность их образования. На примере расселения юкагиров с XVII по начало XXI в. обращает внимание, что для выявления современной этнической территории и понимания закономерностей ее формирования большое значение имеет изучение исторических ареалов расселения. Уделяет внимание неоднородности этнической территории, которая может состоять из этнического ядра (компактно живущей на определенной территории основной части этноса), этнической периферии (компактных групп представителей данного этноса, так или иначе отделенных от основной его части) и этнической диаспоры (отдельных членов этноса, рассеянных по территориям, которые занимают другие этнические общности). Предлагает для определения этнических территорий использовать официальные статистические данные в сочетании с экспедиционными обследованиями и детальным анализом современной ситуации традиционных хозяйств. Культуру коренных малочисленных народов отличают уязвимость и глубокая связь с природными ландшафтами, которая выражается не только в материальной, но и духовной культуре. Поэтому показатели, определяющие границы этнической территории, должны максимально учитывать эти этнокультурные особенности.

Ключевые слова: коренные малочисленные народы, этническая территория, расселение, территории традиционного природопользования, картографирование

**PROBLEMS OF DETERMINING THE ETHNIC TERRITORIES
OF INDIGENOUS PEOPLES OF RUSSIA (THE EXAMPLE OF YAKUTIA)**

Degteva Z.F.

M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, e-mail: degteva.z@bk.ru

The article presents the author's vision of the problems faced by the researcher in defining the ethnic territories of small indigenous peoples of Russia. Theoretical bases of the definition of ethnic territories are considered, and the regional peculiarities of the development of the space by the peoples are analyzed. The focus is on the specific values and attributes of small-numbered peoples' way of life. A special approach to defining the ethnic territory of small-numbered indigenous peoples is substantiated. The author pays attention to mathematical and statistical methods that can be used to identify the concentration of small ethnic community in the territory. And describes the characteristic features of the territories of traditional nature use in the Republic of Sakha (Yakutia), the status and sequence of their formation. Using the example of Yukaghir settlements from the seventeenth to the beginning of the twenty-first century, author notes that the study of historical settlement areas is very important for identifying the modern ethnic territory and understanding the patterns of its formation. Attention is paid to the heterogeneity of ethnic territory, which can consist of the ethnic core (the main part of an ethnic group living compactly in a certain territory), the ethnic periphery (compact groups of representatives of that ethnic group, somehow separated from the main part of it) and the ethnic diaspora (individual members of the ethnic group dispersed over territories occupied by other ethnic communities). It is suggested that official statistical data combined with expeditionary surveys and a detailed analysis of the current situation of traditional households be used to identify ethnic territories. Indigenous culture is characterized by vulnerability and a deep connection with natural landscapes, which is expressed not only in material but also in spiritual culture. Therefore, the indicators that define the boundaries of an ethnic territory must consider these ethno-cultural features as much as possible.

Keywords: indigenous peoples, ethnic territory, settlement, mapping, territories of traditional land use

В условиях глобализации перед исследователями особо остро встают вопросы сохранения этнокультурного разнообразия, традиционного уклада жизни, материальной и духовной культуры и родного языка коренных малочисленных народов. Одним из важных факторов для развития и сохранения традиционной культуры малочислен-

ных народов служит пространственно-территориальный. Территория обеспечивает формирование культурных, языковых и хозяйственных связей, а природные условия и ресурсы в значительной степени влияют на виды хозяйственной деятельности этноса. В связи с этим особого внимания заслуживает определение современных

этнических территорий коренных малочисленных народов России и последующее их картографирование.

Выявление этнической территории и ее картографирование всегда было трудной задачей для исследователей. Это связано с существованием различных взглядов на понимание этнической территории и выбором оптимального способа ее картографирования. Хорошо известен факт значимости этнического картографирования. Картографирование не только является более наглядным методом выражения результатов изучения того или иного вопроса, это – особый вид научного исследования [1]. При создании этнографических карт могут применяться различные способы: значки, ареалы, точечный способ, качественный и количественный фон и др. Однако случается, что идеально подходящий способ для отображения этнической территории одного этноса становится малоинформативным для картографирования территорий другого. Поэтому в ряде случаев на одной карте могут сочетаться различные картографические способы. В связи с этим наиболее широкое распространение получил метод «этнических территорий», который совмещает в себе применение способа качественного фона на моноэтнических территориях и нанесение полосок (или точек) соответствующего цвета на территориях со смешанным этническим составом. При всех достоинствах метода отмечается существенный недостаток, который выражается в искаженном представлении о количестве и значимости того или иного народа при отсутствии непосредственных данных о его численности [1]. Необходимо отметить, что данный недостаток особенно ярко может проявиться при анализе этнических территорий коренных малочисленных народов России. Территории традиционного природопользования коренных малочисленных народов, занимая чаще всего большие площади, имеют предельно низкую плотности населения. В этом случае использование качественного фона приведет к искаженному восприятию численности населения на этнической территории. Условные обозначения в виде значков на светлом фоне для районов с низкой плотностью населения также могут вызывать искаженное восприятие территории как «ничейной» или «неиспользуемой». Очевидно, что определение этнической территории коренных малочисленных народов нуждается в специальном подходе. Необходимо акцентировать внимание на особый

по ценностям и атрибутам уклад северных сообществ, мощные традиции коренных малочисленных народов и их традиционное природопользование, а не на «сглаживание» и «усреднение» изучаемых процессов и явлений [2]. В связи с этим актуальным представляется выявление специфических черт этнических территорий коренных малочисленных народов для последующего их картографирования.

Исследование выполнено при реализации государственного контракта на оказание услуг по организации экспедиций в места проживания КМНС, а также разработке иных материалов в рамках проекта «Цифровизация языкового и культурного наследия коренных народов Арктики» № 01-ОК.

Целью работы является обоснование необходимости особого подхода к определению этнической территории коренных малочисленных народов Российской Федерации.

Материал и методы исследования

Теоретические основы определения этнических территорий сформированы в трудах отечественных этнологов и географов: Брука С.И., Кушнера П.И., Покшишевского В.В., Семенова Ю.И., Тишкова В.А. и др. При этом, как отмечают ведущие географы, в постсоветский период в общем объеме научных исследований по географии населения работы по этнической географии относительно немногочисленны [3]. Региональные особенности освоения пространства коренными малочисленными народами проанализированы в работах Т.М. Красовской, А.Г. Манакова, М.В. Рагулиной [4-6], в том числе Республики Саха (Якутия) [7-9]. В небольшом количестве представлены работы по картографированию этнической структуры населения и ее трансформации [10; 11]. В исследовании применялись математико-статистические и геоинформационные методы. Наборы пространственных и атрибутивных данных в ГИС были организованы согласно принятой иерархии административно-территориального деления Российской Федерации, так как по ним собираются и публикуются данные государственной статистики.

Результаты исследования и их обсуждение

Понятие этнических территорий рассматривалось многими известными этнографами и географами. При определении этнических территорий, по мнению В.В. Покшишевского, возможны два подхода. Этни-

ческой территорией можно считать территорию, на которой большинство населения принадлежит к данной этнической общности, а возможно рассматривать как этническую ту территорию, на которой сосредоточена основная масса данного этноса, безотносительно к тому, что он может здесь и не составлять большинства [12]. П.И. Кушнер считал, что численный перевес народа не является надежным способом выявления действительных границ расселения этноса, так как он не обеспечивает возможности установить этнические территории мелких этнических групп, не показывает те части территории, на которых многочисленные народы не составляют большинства, не создает условия для раскрытия многонациональных территорий. Кроме этого, понятие абсолютного или относительного большинства меняется в зависимости от того, в каких границах производится подсчет [13].

В основе определения этнических границ для многочисленных компактно проживающих народов возможен подход, который основывается на численности и удельном весе определенного этноса в пределах какой-либо территории. Однако для малочисленных народов данный подход не может быть реализован. Этнической территорией коренных малочисленных народов необходимо считать ту территорию, где сосредоточена основная масса данного этноса, даже если его доля в численности населения предельно мала. Именно такой подход обеспечит возможность определить территорию современного расселения для каждого малочисленного народа в полиэтническом пространстве, от самого малочисленного народа России – кереков (4 чел.), проживающих в Чукотском автономном округе, до абазин (43,3 тыс. чел.), компактно проживающих в Карачаево-Черкесской Республике, и ненцев (44,6 тыс. чел.), проживающих в шести субъектах РФ (по переписи 2010 г.).

Чтобы реализовать выбранный подход определения этнических территорий малочисленных народов, возможно применение математико-статистических методов. Одним из методов выявления концентрации этноса на территории может служить коэффициент этнической общности, который рассчитывается по формуле:

$$K = K_1 \cdot K_2,$$

где K – коэффициент этнической общности, K_1 – доля представителей данной этниче-

ской группы в населении какого-либо района, K_2 – доля представителей данной этнической группы какого-либо района в общей численности населения этнической группы исследуемой территории.

Кроме того, пространственный анализ размещения этнических общностей может быть рассмотрен с применением индекса локализации:

$$L = D_i / D_0,$$

$$D_i = A_i / B_i,$$

$$D_0 = A_0 / B_0,$$

где L индекс локализации; D_i – отношение численности этнической группы i района к общей численности населения i района; D_0 – отношение представителей этнической общности исследуемой территории к общей численности населения этой же территории; A_i – численность представителей этнической группы в i районе, A_0 – численность этнической группы, представленной на исследуемой территории, B_i – общая численность населения i района, B_0 – общая численность населения исследуемой территории.

Достаточно часто географическое пространство основного расселения или формирования этноса законодательно может резервироваться для преимущественного или исключительного проживания и использования представителями этнических общин, которые ведут традиционный образ хозяйствования и культура которых нуждается в особых мерах защиты [14]. Согласно Единому Перечню коренных малочисленных народов (с изменениями на 18.12.2021 г.) в Российской Федерации указано 47 коренных народов с численностью менее 50 тысяч человек. Правовые основы образования, охраны и использования территорий традиционного природопользования (ТТП) коренных малочисленных народов Севера, Сибири и Дальнего Востока Российской Федерации для ведения ими на этих территориях традиционного природопользования и традиционного образа жизни устанавливает Федеральный закон № 49-ФЗ. На его основе могут быть установлены федеральные, региональные или местные ТТП. Так, в Республике Саха (Якутия) решениями органов местного самоуправления (по состоянию на 28.01.2022) образовано 63 территории традиционного природопользования, 60 из которых созданы в границах административно-территориальных единиц республики – районов и наслегов (рис. 1).

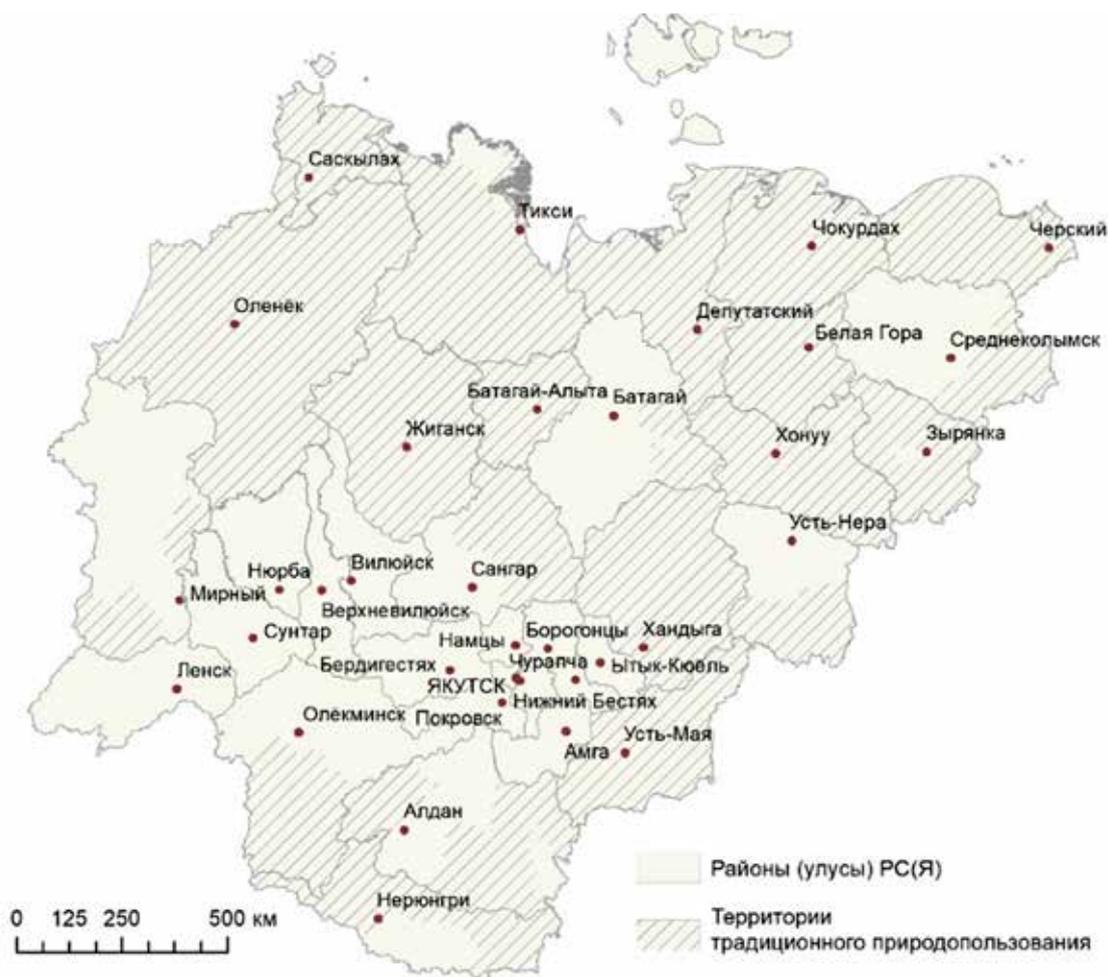


Рис. 1. Территории традиционного природопользования Якутии по состоянию на 28.01.2022 (составлено автором по материалам, предоставленным Министерством по развитию Арктики и делам народов Севера РС (Я))

Географическое положение этнической территории и связанные с ним природные условия и ресурсы оказывают существенное воздействие на особенности развития различных сторон материальной и духовной культуры этноса, а территориальные отношения с другими народами определяют многие особенности этнической истории [1]. В ходе длительных этнических процессов различного характера (миграции, смешения с другими этносами, изменение этнического самосознания и др.) историческая территория формирования этноса может не совпадать с географическим пространством современного расселения. Кроме того, численно доминирующий когда-то этнос может в настоящее время составлять незначительную долю населения на данной территории (рис. 2). Совершенно очевидно, какое большое значение имеет

изучение исторических ареалов расселения той или иной этнической общности для понимания закономерностей формирования и выявления современной этнической территории.

Еще одна особенность – этническая территория неоднородна. Этнос может состоять из этнического ядра (компактно живущей на определенной территории основной части этноса), этнической периферии (компактных групп представителей данного этноса, так или иначе отделенных от основной его части) и этнической диаспоры (отдельных членов этноса, рассеянных по территориям, которые занимают другие этнические общности) [15]. Понятие «компактное расселение» – это форма расселения, при которой жители сохраняют этнические связи, стараясь проживать поблизости от своих соплеменников.

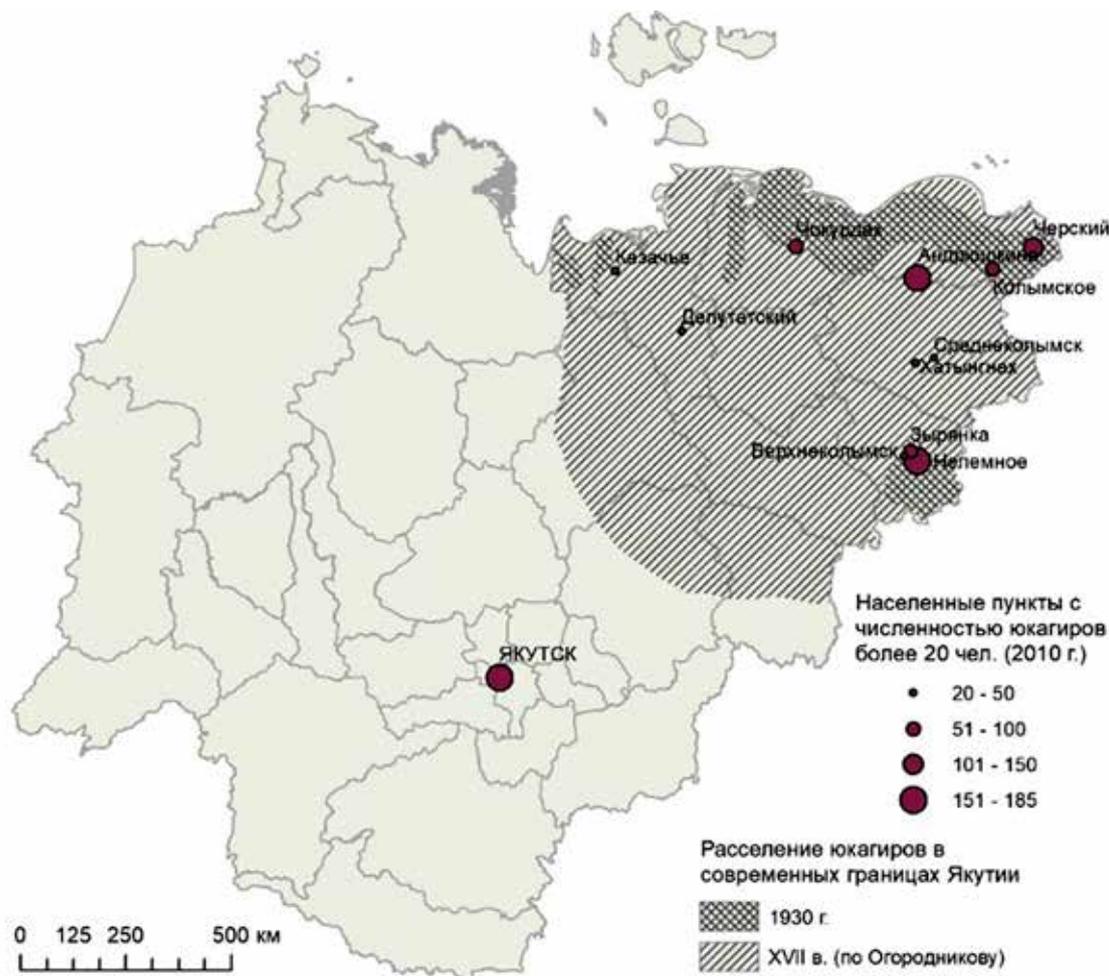


Рис. 2. Динамика расселения юкагигов в современных границах Якутии (составлено автором по итогам Всероссийской переписи населения 2010 г. и материалам «Большой советской энциклопедии» 1931 г.)

В отличие от компактного расселения «рассеянное расселение» предполагает нарушение этнических связей, проживание семей в окружении чуждого им этнического массива [13]. Как правило, типичные черты этнической культуры и знание родного языка лучше всего сохраняются в этническом ядре и постепенно трансформируются в этнической периферии и диаспоре. Однако сознательный акт этнического самоопределения человека не всегда соотносится со знанием языка и культуры этноса. Исходя из этого, целесообразно при определении этнических территорий использовать принцип этнического самоопределения, т.е. причисления себя к той или иной этнической общности. В первых переписях населения за основу этнического учета бралось происхождение. Опрос о национальной принадлежности, а не происхождении, стал

использоваться в переписных листах СССР начиная с 1926 г. [13]. Неслучайно именно перепись населения может служить одним из основных источников информации о численности, этническом составе населения и его распределении для формирования ГИС-базы данных. Во-первых, перепись – это источник данных, собранных по единой программе по всей территории Российской Федерации. Во-вторых, что особенно важно для данного исследования, при проведении переписи применяется принцип этнического самоопределения. В-третьих, – это достаточно высокая детализация. Учет этнического состава населения производится на уровне населенных пунктов, что дает возможность применить различные показатели, в том числе рассмотреть потенциал поля расселения, определить центр тяжести населения, воспользоваться системой

графов и др. Это способствует выявлению существенных признаков для определения этнических территорий коренных малочисленных народов, в том числе в полиэтническом пространстве.

Заключение

Этническая территория коренных малочисленных народов имеет фундаментальные отличия, что предлагает особый подход к ее определению. Самобытная этническая культура коренных малочисленных народов уязвима и в силу своей зависимости от природного ландшафта обуславливается его существованием. Поэтому для определения этнических территорий недостаточно знать только численность населения и расселение, необходимо учитывать образ жизни коренных малочисленных народов, тесную связь с ресурсной базой природного ландшафта и систему этнического природопользования. В связи с этим этнической территорией коренных малочисленных народов целесообразно считать культурно и хозяйственно освоенное пространство – места кочевого животноводства, охоты, рыболовства, бортничества, собирательства, а также сакральные и памятные исторические места.

Этническая территория под действием различных исторических процессов постоянно претерпевает изменения, которые происходят и в настоящее время. И только в динамике можно понять сущность и тенденции этих изменений.

Единые методологические принципы, положенные в основу Всероссийской переписи населения, позволят сохранить общий подход при картографировании. Для определения этнических территорий официальная статистика имеет большое значение, но только в сочетании с экспедиционными обследованиями и детальным анализом современной ситуации в традиционных хозяйствах.

Список литературы

1. Брук С.И. Историко-этнографическое картографирование и его современные проблемы // Советская этнография. 1973. № 3. С. 3-18.
2. Пилясов А.Н. Арктическая диагностика: плох не метр – явление другое // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2018. № 5(61). С. 35-54.
3. Алексеев А.И., Савоскул М.С., Сафронов С.Г. Отечественная география населения в постсоветский период: основные направления и тренды их развития // Региональные исследования. 2016. № 2(52). С. 55-65.
4. Красовская Т.М. Прикладные направления использования концепции культурного ландшафта // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2018. № 3. С. 11-22.
5. Манаков А.Г., Бочарникова А.В., Теренина Н.К. Факторы динамики численности разделенных границами частей малочисленных народов вепсов и сету (сету) // Этнография. 2022. № 3(17). С. 49-69.
6. Рагулина М.В. Культурный ландшафт: интегральный взгляд: монография / отв. ред. Сирина А.А. Ульяновск: Зебра, 2015. 147 с.
7. Пространство жизнедеятельности «исчезающего» этноса: юкагиры Якутии в XX–XXI вв. / В.В. Филиппова, А.А. Сулейманов, В.И. Шадрин и др. Владивосток: ФГУП «Издательство Дальнаука», 2020. 324 с.
8. Саввинова А.Н., Филиппова В.В., Литвиненко Т.В. Динамика сельского населения арктических районов Республики Саха (Якутия) в постсоветский период: общие тенденции и географические различия // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 2. С. 277-290. DOI 10.25283/2223-4594-2021-2-277-290.
9. Неустроева А.Б., Самсонова И.В., Малышева М.С., Семенова Л.А. Современное положение традиционных хозяйств коренных малочисленных северных народов в Республике Саха (Якутия) // Журнал социологии и социальной антропологии. 2020. Т. 23. № 3. С. 220-245.
10. ГИС «этнический атлас Ставропольского края» / В.С. Белозеров, А.Н. Панин, Р.А. Приходько и др. // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2015. Т. 21. С. 13-18.
11. Воронин И.Н., Сикач К.Ю., Сазонова Г.В., Швец А.Б. Картографирование трансформационных процессов в этнодемографическом пространстве Крыма // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2021. Т. 27. № 4. С. 273-291.
12. Покшишевский В.В. Население и география. М.: Мысль, 1978. 315 с.
13. Кушнер П.И. Этнические территории и этнические границы. М.: Изд-во АН СССР, 1951. 274 с.
14. Тишков В.А. Этническая территория // Народы и религии мира. Энциклопедия. М., 2000. 901 с.
15. Семенов Ю.И. Этнос, нация, диаспора // Этнографическое обозрение. 2000. № 2. URL: https://scepsis.net/library/id_160.html (дата обращения: 03.11.2022).

УДК 550.4:631.4

БИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АГРОЛАНДШАФТОВ РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Коханистая Н.В., Шишкина Д.Ю., Закруткин В.Е.

ФГБОУ ВО «Южный федеральный университет», Ростов-на-Дону,
e-mail: nvkohanistaya@sfedu.ru

В последнее время наблюдается активное развитие всех отраслей промышленности, транспорта, сельского хозяйства в пределах юга России. На территории Ростовской области широко развит агропромышленный комплекс, занимающий более 84% ее территории и характеризующийся высокоэффективным растениеводством, производством зерна и подсолнечника. В статье исследованы почвенный покров и продуктивная часть сельскохозяйственных культур области. С целью изучения уровня преобразования почв агроландшафтов использованы региональные фоновые содержания тяжелых металлов (Cr, Mn, Cu, Zn, Cd, Pb, Ni, V). Выявлено изменение распределения микроэлементов в верхнем почвенном слое при применении различных сельскохозяйственных технологий, отличающихся объемами внесения удобрений, способами обработки почвы и т.д. Выявлено, что в почвах под рисовыми полями и виноградниками формируются наиболее благоприятные условия для накопления большинства исследуемых микроэлементов. В ходе исследований была изучена дифференциация основных культур по ряду тяжелых металлов. Анализ полученных данных указывает на существование тенденции роста средних содержаний микроэлементов от зерновых культур к кормовым травам, что связано с почвенными условиями, видовыми биологическими особенностями, а также тем, какая часть растения анализировалась. По содержанию элементов в почвах рассчитаны коэффициент биологического поглощения и биогеохимическая активность исследуемых культур, что позволило ранжировать их по способности к накоплению тяжелых металлов. Как показали результаты исследования, кормовые травы интенсивно накапливают все рассматриваемые микроэлементы. Среди овощей выделяются корнеплоды (свекла), характеризующиеся активным накоплением большинства тяжелых металлов. В меньшей степени в биогенную миграцию элементы вовлекает виноград.

Ключевые слова: тяжелые металлы, агроландшафт, коэффициент биологического поглощения, биогеохимическая активность, Ростовская область

BIOGEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF AGRICULTURAL LANDSCAPES OF THE ROSTOV REGION

Kokhanistaya N.V., Shishkina D.Yu., Zakrutkin V.E.

Southern Federal University, Rostov-on-Don, e-mail: nvkohanistaya@sfedu.ru

Recently, there has been an active development of all industries, transport, agriculture within the south of Russia. On the territory of the Rostov region, the agro-industrial complex is widely developed, occupying more than 84% of its territory and characterized by highly efficient crop production, grain and sunflower production. The article examines the soil cover and the productive part of the agricultural crops of the region. Regional background contents of heavy metals (Cr, Mn, Cu, Zn, Cd, Pb, Ni, V) were used to study the level of soil transformation of agricultural landscapes. A change in the distribution of trace elements in the upper soil layer has been revealed with the use of various agricultural technologies differing in the amount of fertilizer application, methods of tillage, etc. It was revealed that the most favorable conditions for the accumulation of most of the studied trace elements are formed in the soils under rice fields and vineyards. In the course of the research, the differentiation of the main crops by a number of heavy metals was studied. The analysis of the data obtained indicates the existence of an increase trend in the average content of trace elements from grain crops to forage grasses, which is associated with soil conditions, species biological characteristics, as well as which part of the plant was analyzed. According to the content of elements in soils, the coefficient of biological absorption and biogeochemical activity of the studied crops were calculated, which made it possible to rank them according to their ability to accumulate heavy metals. As the results of the study showed, forage grasses intensively accumulate all the microelements under consideration. Among vegetables, root crops (beets) are distinguished, characterized by the active accumulation of most heavy metals. To a lesser extent, grapes are involved in the biogenic migration of elements.

Keywords: heavy metals, agricultural landscape, biological absorption coefficient, biogeochemical activity, Rostov region

Степи юга Европейской части России – зона интенсивного сельскохозяйственного производства, где выращивается около 80% земледельческой продукции страны. По стоимости произведенной в 2021 г. сельскохозяйственной продукции Ростовская область занимает 2 место в России, уступая только Краснодарскому краю – региону с гораздо более благоприятными природно-климатическими условиями [1]. Основная отрасль

сельского хозяйства области – растениеводство. В 2021 г. Донской край произвел 10,6% общероссийского урожая подсолнечника, 9,3% зерна, 4,0% овощей и 3,2% плодов и ягод.

Сельскохозяйственные угодья занимают более 80% общей площади области. На долю пашни приходится 57,9% всей ее территории [2]. Посевные площади, резко сократившиеся в 1990-х гг., с 2001 г. постоянно

увеличиваются. Одновременно повышается агротехногенная нагрузка на территорию, что проявляется в росте применяемых минеральных удобрений. За последние три года доза вносимых удобрений превысила 80 кг на 1 га посева [3]. Это максимальная величина за всю историю земледелия на Дону.

В соответствии с классификацией Н.С. Касимова [4] на территории Ростовской области выделены следующие отделы агроландшафтов: полевые, огородные (овощные), рисовые плантации и ландшафты с многолетними культурами (сады и виноградники). При дальнейшем разделении на классы, когда учитываются особенности водной миграции, выделяются неорошаемые (богарные) и орошаемые ландшафты, представленные овощными и рисовыми плантациями.

Полевые богарные ландшафты абсолютно доминируют на территории Ростовской области. Из-за дефицита водных ресурсов площадь орошаемых земель сократилась в 2 раза по сравнению с 1980-ми гг. и сейчас составляет около 3,6% от общей площади пашни. Сады и виноградники занимают еще меньшее пространство – менее 1%.

Почвенный покров агроландшафтов образован преимущественно черноземами и каштановыми почвами. Черноземы занимают основную часть Ростовской области; на засушливом востоке и юго-востоке развиты каштановые почвы. Среди почв черноземного ряда выделяют следующие подтипы: черноземы южные, обыкновенные, североприазовские и предкавказские, а также лугово-черноземные почвы. Каштановые почвы представлены темно-каштановыми, каштановыми и светло-каштановыми подтипами. Их отличительной чертой является солонцеватость, растущая в восточном направлении.

Внесение больших количеств минеральных удобрений приводит к нарушению биогеохимических циклов миграции элементов и накоплению тяжелых металлов (ТМ) во всех блоках агроэкогеосистем. Таким образом, целью исследования является исследование распределения ТМ в почвенно-растительном покрове различных агроландшафтов.

Материалы и методы исследования

В основу работы положены результаты эколого-геохимической съемки на территории 42 агропредприятий разной сельскохозяйственной специализации, расположенных

в различных природно-сельскохозяйственных зонах Ростовской области (рисунок). Опробование включало в себя отбор проб поверхностного (0–20 см) почвенного горизонта и сельскохозяйственных культур.

Эколого-геохимическая съемка проводилась в 2015–2018 гг. по сети $0,5 \times 0,5$ км. Отбор почвенных образцов выполнялся методом конверта с пробной площадки размером 10×10 м. В ходе проведенных работ было отобрано 477 проб.

На каждой площадке одновременно с почвой отбирали пробу продуктивной части сельскохозяйственной культуры. Опробование проводилось по достижению культурами товарной зрелости. В результате было отобрано 311 проб сельскохозяйственных растений, из них: 187 проб зерновых и зернобобовых культур, 74 – кормовых трав, 29 – фруктов, 21 – овощей.

В почвенных и растительных образцах методом атомно-абсорбционной спектроскопии определялось содержание ванадия, кадмия, марганца, меди, никеля, свинца, хрома и цинка. Для почвенных проб рассчитывались коэффициенты концентрации и рассеяния тяжелых металлов по отношению к местному геохимическому фону. Интенсивность накопления тяжелых металлов в сельскохозяйственных культурах выражалась через коэффициент биологического поглощения (КБП), полученный делением содержания химического элемента в растении на его содержание в почве.

Результаты исследования и их обсуждение

Для оценки уровня антропогенного преобразования сельскохозяйственных ландшафтов необходимо знать содержание химических элементов в ландшафтах фоновых территорий. Эталонные фоновые ландшафты должны располагаться вне зоны влияния промышленного и сельскохозяйственного загрязнения [4]. Интенсивное земледельческое освоение территории обусловило исчезновение естественных степей, поэтому в качестве фоновых величин многими учеными используются концентрации ТМ в почвах локальных охраняемых природных территорий [5]. В настоящей работе за природный геохимический фон приняты содержания ТМ в почвах пастбищ, наиболее отдаленных от основных источников загрязнения районов Ростовской области [6]. Региональные фоновые концентрации ТМ в почвах представлены в табл. 1.



Схема расположения агропредприятий

На схеме цифрами обозначены: 1 – ООО «Север»; 2 – СПК «Тихий Дон»; 3 – ТОО «Вешенское»; 4 – СПК «Киевский»; 5 – ПОО ТОО «Октябрь»; 6 – ООО «Партнер»; 7 – ООО «Слава»; 8 – СТ «Мичуринец»; 9 – ООО «Родина»; 10 – КФХ «Колос»; 11 – ООО «Стычное»; 12 – ООО «Винсовхоз Цимлянский»; 13 – ООО «Плодсовхоз»; 14 – СПК «Зори Волгодонска»; 15 – ООО «Мелиоратор»; 16 – ОАО «Янтарное»; 17 – АО «Бакланниковское»; 18 – ФЛ «Междуреченский»; 19 – СПК «Елгинский»; 20 – КФХ «Руно»; 21 – ООО «ССЦ «Макошь»; 22 – ООО «Центр-Агро»; 23 – СПК Колхоз «Приазовье»; 23 – ПСХК «Александровский»; 24 – СПК Колхоз «Краснокутский»; 25 – ООО «Степное»; 26 – Раздорское СКО; 27 – ООО «Винодельня Ведерниковъ»; 28 – ТНВ «Янтарное Природный»; 29 – ООО «Ольгинское»; 30 – ООО «Ключевое»; 31 – СКО «Целинская»; 32 – ООО «Агрофирма «Целина»; 33 – СПК «Лиманный»; 34 – ООО «Степь»; 35 – СПК «Зерновое»; 36 – ООО «Красноармейское»; 37 – СПК «Восток»; 38 – ООО «Зори Ставрополя»; 39 – ООО «Агрофирма Донагро-78»; 40 – СПК «Родина»; 41 – ООО «Алмаз»; 42 – СПК Племзавод «Подгорное»

Таблица 1

Фоновые содержания ТМ в почвах Ростовской области, мг/кг [6]

Показатель	Cr	Mn	Cu	Zn	Pb	Cd	Ni	V
Региональный природный фон	61,5	750,0	34,8	84,3	24,0	0,21	43,8	97,0

Таблица 2

Содержания ТМ в различных типах почв полевых неорошаемых ландшафтов Ростовской области [7, 8]

Химический элемент	Черноземы южные	Черноземы предкавказские	Черноземы обыкновенные	Черноземы приазовские	Лугово-черноземные	Каштановые
Cr	60	61	65	67	68	62
Mn	742	724	707	695	718	712
Cu	29,5	31,0	33,0	30,7	33,6	28,0
Zn	72,4	82,5	78,7	75,0	85,0	72,4
Cd	0,25	0,26	0,23	0,25	0,25	0,24
Pb	28,3	29,0	25,8	27,2	26,7	26,9
Ni	41	42	45	42	44	36
V	92	99	96	92	97	110

Как уже отмечалось, наиболее распространенными агроландшафтами в пределах Ростовской области являются неорошаемые (богарные) ландшафты, отличающиеся минимальным агрогенным преобразованием почвенной среды. На их примере возможно изучение распределения химических элементов в разных типах почв области (табл. 2).

Анализ содержаний элементов в почвах богарных ландшафтов выявил незначительные различия в концентрациях ТМ внутри разных типов почв. Это объясняется общей направленностью почвообразовательного процесса и слабой литогеохимической дифференциацией почвообразующих пород. По особенностям распределения в почвах выделяются следующие группы элементов:

1) Cr, Cu, Zn и Ni, для которых незначительное увеличение концентраций наблюдается в ряду: каштановые – подтипы черноземных – лугово-черноземные почвы;

2) V, накапливающийся в основном в каштановых почвах;

3) Mn, Cd и Pb, для которых установлена слабая дифференциация элементов в разных подтипах почв.

В целом среднее содержание микроэлементов в почвах неорошаемых ландшафтов близко к фоновым величинам. Исключение составляют кадмий и свинец, содержание которых превышает естественный педогеохимический фон в 1,1–1,2 раза, а также медь

и цинк, чьи концентрации в 1,1–1,25 раза меньше фона.

Мелиорируемые ландшафты и многолетние насаждения испытывают более мощное агротехногенное воздействие, обусловленное интенсивным внесением минеральных удобрений и пестицидов, глубокой вспашкой, привнесением химических элементов с оросительной водой и др. Так, орошаемое земледелие характеризуется значительным воздействием на протекающие процессы миграции вследствие изменения водного баланса в системе вода (орошительная, грунтовая, дренажная) – почва, дополнительного поступления химических элементов с удобрениями и пестицидами, а иногда и изменения структуры почвенного покрова. Эти факторы вызывают возникновение более значительной дифференциации содержания элементов в верхнем почвенном покрове агроландшафтов (табл. 3).

Средние содержания Cr, Cu, Cd, и Pb в почвах мелиорируемых типов ландшафтов превышают естественный педогеохимический фон в 1,1–2,6 раза; средние содержания Cu в рисовых чеках, Zn в почвах садов и V в почвах ландшафтов многолетних насаждений сопоставимы с фоновыми величинами. Концентрации Mn в почвах орошаемых ландшафтов и Ni в почвах овощных плантаций и рисовых чеков составляют 0,7–0,8 долей от фона.

Таблица 3

Содержания ТМ в почвах различных агроландшафтов, мг/кг [7, 8]

Химический элемент	Полевые пахотные	Ландшафты многолетних насаждений		Мелиорируемые	
	богарные	сады	виноградники	орошаемые	периодически заливаемые
				овощные плантации	рисовые чеки
Cr	64	77,1 (1,3)	86,0 (1,4)	84,1 (1,4)	94,2 (1,5)
Mn	716	592 (0,8)	508 (0,7)	583 (0,8)	411 (0,5)
Cu	31 (0,9)*	55,6 (1,6)	90,2 (2,6)	38,9 (1,1)	34,8
Zn	78 (0,9)	83,2	78,3(0,9)	77,9 (0,9)	78,4 (0,9)
Cd	0,25 (1,2)**	0,29 (1,4)	0,28 (1,3)	0,26 (1,2)	0,27 (1,3)
Pb	27,3 (1,1)	30,3 (1,3)	29,9 (1,2)	29,4 (1,2)	29,8 (1,2)
Ni	42	47 (1,1)	49 (1,1)	34 (0,8)	37 (0,8)
V	98	95	92	105 (1,1)	124 (1,3)

Пр и м е ч а н и е . * – коэффициент рассеяния (K_p); ** – коэффициент концентрации (K_k).

Периодически заливаемые ландшафты отличаются наиболее интенсивным внесением удобрений и пестицидов и длительным пребыванием почвенного покрова под водой, что обусловило специфику геохимических процессов. В почвах рисовых чеков изменчивы щелочно-кислотные и окислительно-восстановительные условия среды, непостоянен гидродинамический режим [9]. За счет нестабильности почвенно-геохимической обстановки формируются как положительные, так и отрицательные аномалии ТМ, а выращенный на этих почвах рис часто обеднен микроэлементами.

Марганец, подвижный в восстановительной обстановке, выносится из рисовых чеков под влиянием периодических восстановительных процессов в почвах, что проявляется в снижении его концентраций в 1,8 раза по сравнению с природным фоном. Содержания хрома, не образующего водорастворимых соединений в ландшафте, и ванадия максимальны в почвах рисовых чеков по сравнению с другими агроландшафтами (табл. 3).

В ландшафтах многолетних насаждений наблюдается значительное повышение содержания Cu (в 2,6 раза выше фонового содержания), что связано с широким применением медьсодержащих фунгицидов – бордоской жидкости и хлорокиси меди [8]. Виноградники по сравнению с садами чаще обрабатываются медьсодержащими препаратами, поэтому концентрации элемента в почвах виноградников намного выше.

Сравнение содержаний ТМ в почвах различных сельскохозяйственных ландшафтов

выявляет отчетливую тенденцию выноса марганца и накопления хрома, меди, кадмия, свинца и ванадия в почвах орошаемых ландшафтов и многолетних насаждений.

Разная обеспеченность почв микроэлементами приводит к различному их накоплению в сельскохозяйственных культурах. Влияние на химический состав растений оказывают не только почвенно-геохимические особенности почв, но и видовая принадлежность растений, биоморфы, фазы вегетации, природные условия и другие факторы.

Содержания тяжелых металлов в сельскохозяйственной растительности Ростовской области изменяются в широких пределах (табл. 4). Наибольшую вариабельность проявляет марганец. Его содержания колеблются от 7–11 мг/кг в плодовых культурах (вишня, яблоки) до 220 мг/кг в свекле. Большая изменчивость содержаний в разных культурах характерна для цинка, кадмия, свинца и никеля. В то же время концентрации хрома и меди находятся в узком диапазоне. Наименьшие содержания Cr наблюдаются в кукурузе (0,14 мг/кг), наибольшие – в эспарцете и капусте (0,28 мг/кг). Весьма равномерно распределение меди в сельскохозяйственных культурах, максимальными концентрациями отличается виноград (9,6 мг/кг).

На фоне широкого диапазона содержаний ТМ в пробах растительности была выявлена следующая тенденция роста средних концентраций Mn, Cu, Zn, Cd, Pb и V в последовательности: зерновые и зернобобовые культуры – овощи и фрукты – кормовые травы.

Таблица 4

Содержания ТМ в продуктивной части сельскохозяйственных культур, выращенных на территории Ростовской области, мг/кг сухого вещества [7, 8, 10]

Культура	Химический элемент							
	Cr	Mn	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	V
<i>Зерновые и зернобобовые культуры</i>								
Пшеница	0,16	44,3	4,3	20,7	0,065	0,63	0,35	0,046
Ячмень	0,17	42,7	4,6	22,7	0,068	0,64	0,34	0,039
Рожь	0,16	37,7	3,2	19,2	0,063	0,41	0,43	0,014
Кукуруза	0,14	29,1	–	–	0,080	0,77	0,30	0,039
Подсолнечник	0,15	30,2	–	–	0,080	0,77	0,24	0,052
Горох	–	–	6,8	30,7	–	0,10	2,09	0,020
<i>Кормовые культуры</i>								
Люцерна	0,25	92,0	8,9	24,7	0,130	1,60	0,59	0,341
Суданская трава	0,21	85,2	9,4	26,0	0,130	1,64	0,46	0,248
Эспарцет	0,28	102,3	5,9	20,9	0,120	1,70	0,66	0,365
<i>Овощи и фрукты</i>								
Томат	0,23	12	7,8	13,9	–	0,41	0,68	0,270
Капуста	0,28	48	3,5	11,9	–	2,6	0,77	0,243
Свекла	0,40	220	6,8	18,3	–	0,09	1,36	0,585
Виноград	0,19	12	9,6	3,6	–	0,16	0,16	0,158
Вишня	0,26	7	7,9	12	–	0,27	0,15	0,175
Яблоко	0,24	11	3,7	7,8	–	0,39	0,11	0,067

Увеличение средних содержаний никеля происходит несколько в ином порядке: овощи и фрукты – кормовые травы – зерновые и зернобобовые культуры. Этот порядок складывается благодаря естественной способности гороха к активному накоплению элемента, отмечаемой многими авторами [11, 12].

Полученная закономерность в накоплении микроэлементов растительностью также может быть объяснена тем, какую часть растения употребляют в пищу: корнеплоды, содержащие максимальное количество элементов (свекла), листья, занимающие по концентрации тяжелых металлов промежуточное положение за счет дополнительной аккумуляции элементов с пылью и атмосферными осадками (капуста) или плоды (вишня, виноград, томаты, яблоки, зерновые культуры). Тем не менее распределение Cr, Mn, Zn, Ni и V в овощах и фруктах подтверждает, что растения аккумулируют химические элементы в следующем порядке: корни > листья > плоды.

Для оценки уровней накопления тяжелых металлов в растениях были рассчитаны коэффициенты биологического поглощения (КБП). Как показали результаты исследо-

вания, сельскохозяйственные культуры вне зависимости от места произрастания склонны накапливать свинец (КБП 3,2–27,9), что происходит за счет высокой техногенной нагрузки. Также растения активно аккумулируют медь (КБП 1,14–7,53) и цинк (КБП 1,09–12,43), что объяснимо их важной биохимической функцией (табл. 5).

Известно, что цинк относится к элементам сильного биологического накопления (КБП превышает единицу); марганец, никель, медь и свинец являются элементами среднего биологического захвата (КБП = 0,1–1); ванадий, хром и кадмий относятся к элементам слабого и очень слабого захвата, КБП которых не превышает 0,1 [13]. В сельскохозяйственных культурах Ростовской области наблюдается увеличение значений КБП кадмия, свинца и меди и перемещение этих элементов на более высокий уровень. Переход хрома в группу среднего биологического захвата отмечается в пшенице (КБП = 0,115), а переход ванадия – в суданской траве (КБП = 0,233). Увеличение интенсивности накопления марганца отмечается в пшенице, кукурузе, суданской траве, эспарцете и свекле, цинка – в горохе и пшенице (табл. 5).

Таблица 5

Коэффициенты биологического поглощения ТМ сельскохозяйственными культурами Ростовской области

Культура	Химический элемент								БХА*
	Cr	Mn	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	V	
Зерновые и зернобобовые культуры									
Пшеница	0,115	2,75	7,53	12,43	0,81	13,2	0,39	0,025	37,25
Ячмень	0,066	0,85	3,83	7,53	0,75	10,1	0,18	0,016	23,32
Рожь	0,052	0,91	3,54	8,53	0,77	8,3	0,27	0,010	22,38
Кукуруза	0,092	1,84	–	–	0,98	11,2	–	–	14,11
Подсолнечник	0,074	0,87	–	–	2,1	21,3	–	–	24,34
Горох	–	–	6,87	12,4	–	3,03	1,22	0,006	23,53
Кормовые культуры									
Люцерна	0,025	0,79	3,16	3,53	2,3	26,6	0,24	0,066	36,71
Суданская трава	0,045	1,12	3,33	3,70	1,46	27,9	0,26	0,233	38,05
Эспарцет	0,067	1,39	2,96	4,20	1,08	12,0	0,19	0,030	21,92
Овощи и фрукты									
Томат	0,025	0,43	2,95	2,63	–	7,0	0,29	0,038	13,36
Капуста	0,041	0,72	1,14	1,94	–	10,1	0,24	0,032	14,21
Свекла	0,065	2,19	2,71	3,65	–	5,1	0,37	0,069	14,15
Виноград	0,020	0,33	2,52	1,09	–	3,2	0,08	0,034	7,45
Вишня	0,021	0,23	3,03	3,07	–	7,6	0,08	0,035	14,07
Яблоко	0,031	1,43	3,40	4,78	–	14,2	0,11	0,036	23,99

Примечание: * БХА – биогеохимическая активность вида.

С помощью показателя биогеохимической активности вида (БХА), получаемой путем суммирования коэффициентов биологического поглощения отдельных элементов, можно оценить общую способность изучаемой культуры к концентрации различных микроэлементов. Наиболее интенсивное вовлечение тяжелых металлов в биогенную миграцию характерно для суданской травы, пшеницы и люцерны, величины БХА которых равны 38,05; 37,25 и 36,71 соответственно, наименее интенсивное – для винограда (БХА = 7,45).

На основании анализа полученных данных можно утверждать, что для кормовых трав характерно интенсивное накопление всех рассматриваемых элементов. Также для свеклы характерно интенсивное накопление 6 из 8 рассматриваемых химических элементов (Cr, Mn, Cu, Zn, Ni и V). Данное обстоятельство связано с тем, что были проанализированы корнеплоды свеклы, которые запасают питательные вещества и ассоциированы с корневой системой.

Заключение

Изучение распределения ТМ в различных генетических типах почв богарных агроландшафтов выявило пониженные содержания Zn и Cu, а также повышенные концентрации Pb и Cd по сравнению с естественным почвенно-геохимическим фоном. В то же время различия в содержаниях элементов между разными типами почв богарных ландшафтов незначительны, что объясняется общей направленностью почвообразовательного процесса и слабой литогеохимической дифференциацией почвообразующих пород.

В почвах мелиорируемых ландшафтов по сравнению с неорошаемыми видна отчетливая тенденция к выносу Mn из почв и накоплению Cr, Cu, Zn, Pb и V. Эта закономерность обусловлена уровнем агротехногенного воздействия, которое увеличивается от богарных агроландшафтов к рисовым чекам и виноградникам.

При изучении сельскохозяйственной продукции была выявлена следующая тен-

денция роста содержания тяжелых металлов: зерновые и зернобобовые культуры – овощи и фрукты – кормовые травы. Среди овощей особого внимания заслуживает свекла, для которой было отмечено повышенное накопление большинства элементов (Cr, Mn, Cu, Zn, Ni, V) относительно остальных рассматриваемых культур.

Список литературы

1. Регионы России. Социально-экономические показатели 2021. Федеральная служба государственной статистики: официальный сайт. 2022. [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204> (дата обращения: 20.10.2022).
2. Экологический вестник Дона «О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2021 году». Министерство природных ресурсов и экологии Ростовской области: официальный сайт. 2022. [Электронный ресурс]. URL: <https://минприродыро.рф/projects/current/19> (дата обращения: 20.10.2022).
3. Ростовская область в цифрах 2021: Статистический сборник. Территориальный орган федеральной службы государственной статистики по Ростовской области: официальный сайт. 2022. [Электронный ресурс]. URL: <https://rostov.gks.ru/folder/30195> (дата обращения: 14.10.2022).
4. Касимов Н.С. Экогеохимия ландшафтов. М.: ИП Филимонов М.В., 2013. 208 с.
5. Чернова О.В., Безуглова О.С. Опыт использования данных фоновых концентраций тяжелых металлов при региональном мониторинге загрязнения почв // Почвоведение. 2019. № 8. С. 1015–1026.
6. Коханистая Н.В., Шишкина Д.Ю. Определение регионального педогеохимического фона (на примере Ростовской области) // Сотрудничество стран БРИКС для устойчивого развития: материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых стран БРИКС (Ростов-на-Дону, 24–26 сентября 2015 г.). Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2015. С. 295–298.
7. Заболотная О.Н. Хром в почвах и сельскохозяйственной растительности Ростовской области // Проблемы геологии, полезных ископаемых и экологии Юга России и Кавказа: материалы IV Международной научной конференции (Новочеркасск, 04–06 февраля 2004 г.). Т. 3. Новочеркасск: Темп, 2004. С. 178–184.
8. Закруткин В.Е., Шишкина Д.Ю., Коханистая Н.В. Тяжелые металлы в почвенно-растительном покрове агроландшафтов степной зоны юга европейской части России (на примере Ростовской области) // Степи Северной Евразии: материалы IX международного симпозиума (Оренбург, 07–11 июня 2021 г.). Оренбург: Издательство Оренбургского государственного университета, 2021. С. 972–973.
9. Алексеенко В.А., Минкина Т.М., Швыдка Н.В., Невидомская Д.Г. Почвы геохимических ландшафтов Нижнего Дона и их экологическая характеристика: монография. Ростов-на-Дону – Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2018. 158 с.
10. Kokhanistaya N.V. Nickel and vanadium in agricultural crops of the Rostov region. 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConferences SGEM 2018. Conf. proceedings (Albena, Bulgaria). 2018. Vol. 18. P. 581–588.
11. Ильин В.Б., Сысо А.И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Изд. СО РАН, 2001. 228 с.
12. Сериккызы М.С., Кызыр К. Изучение пищевых и химических составов бобовых продуктов: горох, фасоль, соя // Инновации в науке. 2016. № 7 (59). С. 110–114.
13. Перельман А.И. Геохимия. М.: Высшая школа, 1989. 528 с.

ДК 551.46

**ОСОБЕННОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ
МАРИНАЛЬНОГО ФИЛЬТРА В УСТЬЯХ РЕК
С УСТОЙЧИВЫМ ГАЛОКЛИНОМ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД
НА ПРИМЕРЕ ДЕЛЬТЫ СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ**

Мискевич И.В., Котова Е.И., Нецветаева О.П.

*ФГБУН Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва,
e-mail: szoioras@yandex.ru*

В работе приведены результаты исследования особенностей формирования вертикальной структуры маргинального фильтра при наличии в устье реки галоклина. Исследование было проведено на примере дельты р. Северной Двины в Белом море, где наблюдаются микроприливные условия. Зимой при наличии ледового покрова и уменьшения величины прилива в дельтовых протоках в зоне смещения речных и морских вод появляется устойчивая вертикальная стратификация вод. Анализ связей содержания взвешенных веществ и значения различных гидрохимических показателей с распределением солености по глубине указывает на наличие на вертикали протяженностью около 8 м по крайней мере двух зон маргинального фильтра. Это гравитационная и коагуляционно-сорбционная ступени. В последней наблюдается нелинейность связей солености с величиной рН и содержанием минеральных солей азота и фосфора. Также зафиксировано возрастание содержания органического вещества, идентифицируемого по параметрам БПК и ХПК, по мере возрастания мутности устьевых вод. Сделан вывод о наличии в зимний период полосовой седиментации взвешенного вещества вдоль протоков дельты р. Северной Двины на глубинах, приуроченных к слою скачка плотности устьевых вод.

Ключевые слова: маргинальный фильтр, галоклин, Северная Двина, дельта, соленость, взвесь, гидрохимия, седиментация

**PECULIARITIES OF THE VERTICAL STRUCTURE OF A MARGINAL FILTER
IN THE MOUTH OF RIVERS WITH A STABLE HALOCLINE IN WINTER
ON THE EXAMPLE OF THE DELTA OF THE NORTHERN DVINA**

Miskevich I.V., Kotova E.I., Netsvetaeva O.P.

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow,
e-mail: szoioras@yandex.ru*

The paper presents the results of the study of the features of formation of the vertical structure of the marginal filter in the presence of a halocline at the mouth of the river. The study was carried out on the example of the delta of the Northern Dvina River in the White Sea, where microtidal conditions are observed. During winter conditions of ice cover and decrease of the tide value at the delta channels a steady vertical stratification of waters appears in the zone of river and sea water mixing. Analysis of relations of suspended matter concentration and values of various hydrochemical indicators with distribution of salinity by depth indicates the presence of at least two marginal filter zones in the vertical length of about 8 meters. These are the gravitational and coagulation-sorption stages. In the latter, there is a non-linear relationship of salinity with pH value and content of mineral salts of nitrogen and phosphorus. Increase in the content of organic matter identified by BOD and COD parameters with increasing turbidity of estuarine waters was also recorded. It is concluded that there is a strip sedimentation of suspended matter along the channels of the Northern Dvina River delta in winter at the depths confined to the density jump layer of estuarine waters.

Keywords: marginal filter, halocline, Northern Dvina, delta, salinity, suspension, hydrochemistry, sedimentation

Наблюдаемое в последние десятилетия климатическое потепление Арктики влечет за собой значительные изменения в процессах перераспределения вещества между морем и сушей. Эти процессы принято оценивать по модели устьевых маргинального фильтра, разработанной академиком А.П. Лисицыным [1]. Она предусматривает, что в зоне смешения речных и морских вод по мере увеличения солености образуются три последовательные зоны – мутьевая «пробка» (гравитационная ступень), геохимическая «пробка» (коагуляционно-сорбционная ступень) и биологическая «пробка». В первой из них отмечается

максимальная мутность устьевых вод и ее постепенное уменьшение, во второй зоне наиболее активно протекают геохимические процессы, и в третьей зоне наблюдается повышенная биопродуктивность морской среды. Например, в Белом море первой зоне соответствует интервал солености 0,5–5‰, второй зоне – 5–20‰ и третьей зоне – соленость более 20‰ [2].

В пространственном отношении традиционно принято считать маргинальный фильтр вытянутым по оси распространения речных вод на морскую акваторию в пределах смешения пресных и соленых вод.

Результаты полусуточной серии гидрологических наблюдений
на рейдовой станции в протоке Маймакса 24 марта 2021 г.

Номер серии	Время, часы	Глубина, м	Горизонт	Соленость, ‰
I	09:00	7,0	поверхность	2,0
			дно	12,4
II	11:00	7,2	поверхность	1,5
			дно	13,8
III	13:00	7,4	поверхность	1,3
			дно	16,0
IV	15:00	7,5	поверхность	1,3
			дно	16,1
V	17:00	7,3	поверхность	1,6
			дно	14,7
VI	19:00	7,1	поверхность	2,2
			дно	13,7
VII	21:00	6,9	поверхность	1,9
			дно	13,1

С этой точки зрения протяженность маргинального фильтра будет колебаться в интервале от нескольких километров до нескольких десятков километров, а в отдельных районах – до 100 и более километров, если принимать во внимание возможную дальность проникновения морских вод в устья рек [3].

В арктических районах при наличии продолжительной зимней межени (4–6 месяцев) в устьях рек может формироваться устойчивая стратификация вод, при которой разница между поверхностной и придонной соленостью может достигать 10–20‰ и даже более. Такой диапазон солености должен захватывать по крайней мере две последовательные зоны маргинального фильтра, но они размещаются на очень коротком пространственном отрезке – не более 10–15 м.

Подобная ситуация наблюдается даже в микроприливных устьях рек, если ледовый покров начинает заметно уменьшать величину прилива. Такой эффект, в частности, фиксируется и в дельте р. Северной Двины в Белом море. Например, в марте 2021 г. в протоке Маймакса около п. Ламоминки по данным полусуточной серии наблюдений на рейдовой станции [4] разница между поверхностным и придонным горизонтом (около 6,5 м) колебалась в диапазоне 10–15‰ (таблица).

Цель данной работы заключалась в исследовании вертикальной структуры маргинального фильтра в дельте р. Северной Двины.

Материалы и методы исследования

Для исследований вертикальной структуры маргинального фильтра в дельте р. Северной Двины в марте 2022 г. был проведен отбор проб воды в протоке Маймакса около п. Лапоминки на той же вертикали, на которой были проведены исследования в марте 2021 г.

В период работы проводились разовые измерения температуры воды, солености, кислорода и величины pH на горизонтах 0,5; 1,5; 2,5; 3,5; 4,5; 5,5; 6,5 и 7,5 м на рейдовой станции с помощью многопараметрического анализатора жидкости *Multi 3420* фирмы *WTW* (Германия). Также были отобраны пробы воды для определения содержания взвешенного вещества, биогенных элементов, БПК₅ и ХПК.

Выделение взвеси проводилось методом мембранной ультрафильтрации под вакуумом через чистые (обработанные 4%-ной соляной кислотой и тщательно промытые бидистиллированной водой) ядерные фильтры (диаметр фильтра – 47 мм; диаметр пор – 0,45 мкм; изготовлены в Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна)). Фильтрация каждой пробы воды проводилась через три параллельных ядерных фильтра при помощи прибора вакуумного фильтрования (ТУ 9471-002-00212038-00) с поликарбонатными фильтродержателями (*Sartorius AG*, Германия) и вакуумного мембранного насоса НВМ 2×2–К (ЗАО «ВЛАДИСАРТ», г. Владимир) с предельным остаточным давлением 50 мм рт. ст.

Количество содержания взвеси в профильтрованном объеме воды (мг/дм^3) определялось гравиметрическим методом как среднее значение разностей между конечным и начальным весом каждого из трех фильтров. Взвешивание ядерных фильтров осуществлялось на электронных лабораторных весах Adventurer Pro model RV214 (OHAUS Europe, Швейцария) со специальным классом точности и ценой деления 0,1 мг.

При определении биогенных элементов пробы воды предварительно фильтровались через ядерные фильтры диаметром 47 мм с диаметром пор 0,45 мкм. Колориметрическое определение массовой концентрации нитритной формы азота (мг/дм^3) проводилось по методу, основанному на образовании азокраски, при взаимодействии нитрита с сульфаниламидом и α -нафтилэтилендиамином солянокислым. Метод колориметрического определения массовой концентрации нитратной формы азота (мг/дм^3) основан на восстановлении нитратов до нитритов в кадмиевых колонках, причем в качестве восстановителя применялся металлический кадмий, а комплексообразующего агента – динатриевая соль ЭДТА (трилон Б). При определении массовой концентрации фосфатного фосфора (мг/дм^3) использовался модифицированный метод Морфи – Райли. Концентрации биогенных элементов измерялись на спектрофотометре модели DR3900 (HACH-LANGE, Германия).

Для определения биохимического потребления кислорода использовался стандартный скляночный метод. Значение БПК₅ определялось как величина разности содержания растворенного кислорода в исходной (контрольной) пробе и в пробе после пятисуточной инкубации. Определение ХПК в нефилтрованных пробах воды осуществлялось по ГОСТ 31859-2012 на спектрофотометре модели DR3900 (HACH-LANGE, Германия). Градуировка анализатора проводилась в диапазоне 10–160 мгО/дм³.

Результаты исследования и их обсуждение

В период работ толщина льда на рейдовой станции составила 48 см. Приливные трещины были выражены очень слабо. Посередине протоки Маймакса располагался поддерживаемый ледоколом судоходный ход с битым льдом.

Величина прилива в период наблюдений составила 0,7 м.

В изменениях температуры воды поверхностного слоя ($-0,1 - -0,3$ °С) в течение суток прослеживался полусуточный приливной цикл. Ее минимумы хорошо совпадали с максимумами солености.

Соленость на участке проводимых исследований колебалась в диапазоне 5,1–15,0‰. На исследуемом участке, как и в марте прошлого года, наблюдалась двухслойная стратификация устьевых вод с наличием сильно распресненного верхнего слоя (соленость – 5,1–5,9‰) и осолоненного нижнего придонного слоя (соленость – 10,3–15,0‰)

Анализ связей распределения солености дельтовых вод по вертикали с содержанием взвешенных веществ и гидрохимическими показателями показал следующее.

Содержание взвешенных веществ на рейдовой станции по вертикали в период отбора проб воды колебалось в диапазоне 2,4–9,2 мг/дм³. Их минимум фиксировался на горизонте 1,5 м, максимум – в придонном слое. Связь содержания взвешенных веществ с вертикальным распределением солености на исследуемом участке протоки Маймакса носила сложный характер (рис. 1) и не отвечала классической структуре маргинального фильтра, если ориентироваться на его распределение вдоль устьевой области р. Северной Двины. Такую ситуацию можно объяснить гидродинамической спецификой влияния ледового покрова на потоки устьевых вод в различные фазы приливного цикла. Она определяет интенсивность взмучивания донных отложений, которое способно формировать концентрации взвешенного вещества в дельтовых водах выше уровня, типичного для чисто речных вод. Тем не менее можно предположить наличие более интенсивной седиментации взвеси в поверхностном слое, ограниченном интервалом 1,5–3,5 м. Этот слой, с одной стороны, находится под влиянием ледового покрова и в зоне вертикального скачка плотности, которые заметно снижают скорости течений.

Данная ситуация должна приводить к формированию иловых отложений в виде прибрежных полос, вытянутых вдоль руслового потока на глубинах 1,5–3,5 м. На меньших глубинах формирование таких отложений зависит от характера контакта донного субстрата с ледовым покровом, который под действием приливов в прибрежной зоне протоки Маймакса периодически садится на грунт.

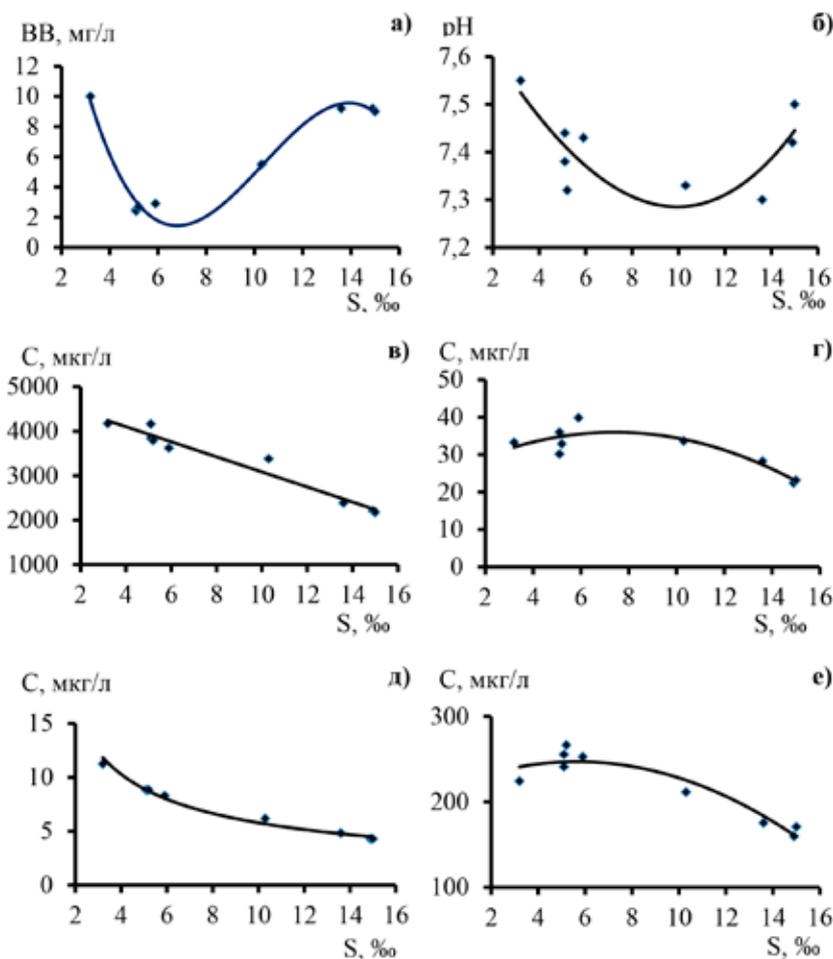


Рис. 1. Графики связи солености на вертикали в протоке Маймакса около п. Лапоминки 18.03.2022 г.: а) с концентрацией взвешенного вещества, б) с рН, в) с содержанием кремния, г) с содержанием фосфатного фосфора, д) с содержанием нитритного азота, е) с содержанием нитратного азота

Связь биогенных элементов, за исключением кремния, с вертикальным распределением солености носила нелинейный характер. Это в целом соответствует представлениям классической модели маргинального фильтра академика А.П. Лисицына в отношении диапазона коагуляционно-сорбционной ступени с соленостью 5–20‰. При этом нелинейность связей нитритов и нитратов с соленостью имела обратный характер (рис. 1), что указывает на наличие процессов нитрификации вод дельты р. Северной Двины даже при отрицательной температуре воды. Для фосфатного фосфора наблюдался процесс «выделения», по всей вероятности, связанный с гидрохимическими процессами.

Связь вертикального распределения солености с параметрами БПК₅ и ХПК в целом имела линейный характер, указы-

вая на возрастание содержания органики с увеличением степени осолонения устьевых вод, что приходит в противоречие с базовым взглядом на обмен органическим веществом между Северной Двиной и морем [5]. Анализ связи значений БПК₅ и ХПК с содержанием взвешенных веществ фиксирует наличие тенденции к повышению содержания органики по мере возрастания мутности дельтовых вод (рис. 2). Это может служить объяснением аномальной корреляции солености с параметрами БПК₅ и ХПК на первых двух ступенях маргинального фильтра устьевой области р. Северной Двины. Наблюдаемая ситуация, в свою очередь, влечет за собой формирование процессов обогащения органикой иловых отложений в зоне седиментации в виде прибрежных полос, вытянутых вдоль руслового потока на глубинах 1,5–3,5 м.

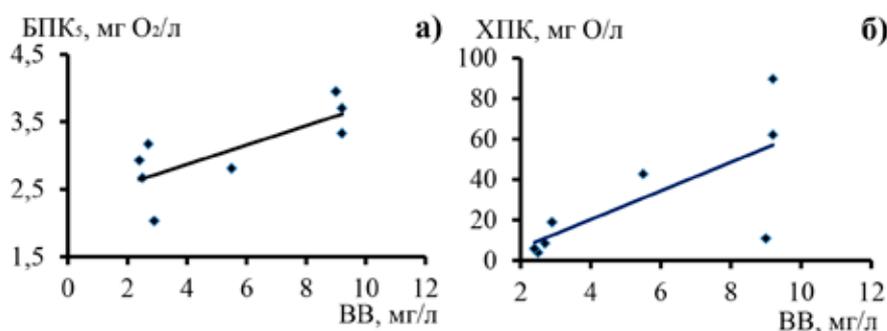


Рис. 2. Графики зависимости содержания взвеси с параметрами БПК₅ (а) и ХПК (б) на вертикали в протоке Маймакса около п. Лапоминки 18.03.2022 г.

Иловые отложения являются хорошим сорбентом для многих видов поллютантов, что может являться причиной значительного загрязнения мелкодисперсных донных отложений прибрежных зон дельтовых протоков в зимний период. Здесь необходимо заметить, что в безледоставный период максимальное загрязнение донных отложений отмечается на устьевом взморье р. Северной Двины вне ее дельты [6]. Быстрее всего аккумуляция загрязняющих веществ в донных грунтах дельтовых протоков носит сезонный характер, так как мощные весенние паводки должны смывать накопленные зимой иловые отложения в Двинский залив [7]. С другой стороны, на отдельных участках дельты за счет особенностей геоморфологии водотоков, где формируются локальные вихреобразные структуры с масштабом метры – десятки метров, способствующие консервации зимних иловых отложений, их высокий уровень загрязнения может наблюдаться более одного года.

Заключение

Таким образом, проведенные в дельте р. Северной Двины в зимнюю межень наблюдения показали, что структура маргинального фильтра, если ориентироваться на вертикальное и пространственное распределение солености, при наличии слоя скачка плотности может иметь заметные различия в содержании взвешенных веществ. В зимнюю межень в дельтовых протоках на глубинах расположения данного водного слоя может наблюдаться выпадение взвеси с формированием полос ила, обогащенных органическими веществами. Для содержания растворенных веществ соблю-

даются позиции, предусмотренные классической моделью маргинального фильтра.

Исследования проведены в ходе выполнения государственного задания по теме «Современные и древние донные осадки и взвесь Мирового океана – геологическая летопись изменений среды и климата: рассеянное осадочное вещество и донные осадки морей России, Атлантического, Тихого и Северного Ледовитого океанов – литологические, геохимические и микропалеонтологические исследования; изучение загрязнений, палеообстановок и процессов в маргинальных фильтрах рек» № FMWE-2021-0006.

Список литературы

1. Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
2. Гордеев В.В., Филиппов А.С., Кравчишина М.Д., Новигатский А.Н., Покровский О.С., Шевченко В.П., Дара О.М. Особенности геохимии речного стока в Белое море // Система Белого моря. Т. II. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. М.: Научный мир, 2012. С. 225–308.
3. Mikhailova M.V. Processes of seawater intrusion into river mouths. Water Resources. 2013. Vol. 40. No. 5. P. 483–498. DOI: 10.1134/S0097807813050059.
4. Мискевич И.В., Лещев А.В., Мосеев Д.С. Биогеохимические характеристики экосистемы дельты реки Северная Двина в зимний период // Естественные и технические науки. 2021. № 7 (158). С. 144–148.
5. Бреховских В.Ф., Брезгунов В.С., Волкова З.В., Перакальский В.М., Абрамов Н.Н., Кременецкая Е.Р., Ломова Д.В. Процессы массопереноса в водных объектах. Черноголовка: Институт проблем химической физики РАН, 2019. 156 с.
6. Котова Е.И., Коробов В.Б., Шевченко В.П., Иглин С.М. Экологическая ситуация в устьевой области реки Северной Двины (Белое море) // Успехи современного естествознания. 2020. № 5. С. 121–129.
7. Иглин С.М., Коробов В.Б. Пространственно-временные особенности заносимости канала Мудьюгских башен в морском порту Архангельск // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 2. С. 48–58.

УДК 502.6

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ОБЪЕКТА ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Олива Т.В., Коновалова Ю.Б., Манохина Л.А., Андреева Н.В.

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина»,
Белгородская область, пос. Майский, e-mail: oliva_tv@bsaa.edu.ru

В статье рассматриваются физико-химические свойства техногенного грунта полигона твердых коммунальных отходов городской свалки ТКО г. Белгород и его воздействие на окружающую среду. В настоящее время на полигоне ТКО, накапливающего отходы с 1974 года, начата процедура рекультивации. Для изучения характеристики техногенного грунта были вскрыты скважины мощностью от 1,5 до 20 м. Изучение физико-химических свойств техногенного грунта полигона ТКО старой городской свалки г. Белгород осуществлялось в рамках инженерно-экологических изысканий с целью проведения рекультивации данной территории и установления возможности ее дальнейшего использования. Мощность свалочного грунта неравномерна и представляет собой насыпь, состоящую из техногенного грунта с включениями инертных строительных отходов, таких как бой кирпича, щебень, песок, стекло, резиново-технических изделий, остатков древесины и прочего. Заполнитель представлен смесью песка разнородного и суглинка от твердой до тугопластичной консистенции. По совокупности факторов техногенный груз площадки полигона ТКО можно отнести ко II категории сложности; в газохимическом отношении грунт относится к категории безопасный. Количество нефтепродуктов и бенз(а)пирена в свалочном грунте составляет 0,006–0,9 ПДК и 0,25 ПДК соответственно. Грунт площадки полигона ТКО имеет допустимую степень токсичности образца. Индекс токсичности меньше 20, что говорит о безвредности грунта для человека, млекопитающих и птиц. Показана возможность выполнения рекультивации полигона ТКО и восстановления плодородия грунта на площадке полигона ТКО, что улучшит экологическую обстановку в районе и исключит возможность загрязнения прилегающей территории.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы, техногенный грунт, нефтепродукты, бенз(а)пирен, индекс токсичности, рекультивация

ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT OF THE MUNICIPAL SOLID WASTE

Oliva T.V., Konovalova Ya.B., Manokhina L.A., Andreeva N.V.

The Belgorod state agrarian university named after V. Gorin, Belgorod region,
settlement Mayskiy, e-mail oliva_tv@bsaa.edu.ru

The article discusses the physical and chemical properties of technogenic soil of the municipal solid waste landfill MSW in Belgorod and its impact on the environment. Currently, the reclamation procedure has been initiated at the test range solid municipal waste, which has been accumulating waste since 1974. To study the characteristics of the technogenic soil, wells with a capacity of 1.5 to 20 m were opened. The study of the physico-chemical properties of the test range solid municipal waste of the old municipal dumping of Belgorod was carried out within the framework of engineering and environmental surveys in order to recultivate this territory and establish the possibility of its further use. The capacity of the landfill soil is uneven and is an embankment consisting of man-made soil with inclusions of inert construction waste, such as brick, crushed stone, sand, glass, rubber and technical products, wood residues and others. The filler is represented by a mixture of sand of various grains and loam from a solid to a refractory consistency. By the combination of factors, the industrial freight of the MSW landfill area can be attributed to the II category of complexity; in terms of gas chemistry, soils are classified as safe. The amount of petroleum products and benz[a]pyrene in landfill soil is 0,006 – 0,9 maximum permissible concentration and 0,25 maximum permissible concentration according to. The soil of the MSW landfill area has a permissible degree of toxicity of the sample. The toxicity index is less than 20, which indicates the harmlessness of the soil for humans, mammals and birds. The possibility of recultivation of the MSW landfill and restoration of soil fertility at the MSW landfill area is shown, which will improve the environmental situation in the area and eliminate the possibility of contamination of the adjacent territory.

Keywords: municipal solid waste, technogenic soil, petroleum products, benz[a]pyrene, toxicity index, recultivation

В государственном документе «Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года» отмечено, что практически во всех регионах страны состояние земель и качество почвы продолжает ухудшаться. В Стратегии отмечен факт, что в настоящее время в стране накоплено более 30 миллиардов тонн отходов производства и потребления. В результате

инвентаризации обнаружено 340 объектов «накопленного вреда окружающей среде», которые являются источниками угрозы здоровью 17 миллионам россиян. Часть полигонов твердых коммунальных отходов (ТКО) и в России, и в Белгородской области требуют незамедлительной рекультивации [1-3]. В 2020 году в Белгородской области по всем видам деятельности образование

отходов по сравнению с предыдущим годом увеличилось на 6,3% и на 14,4% больше, чем в 2010 году [4, с. 351–352]. В настоящее время в государственном реестре РФ зарегистрированы 10 объектов накопленного вреда для размещения отходов из Белгородского региона. В Белгородской области формируется тенденция роста вывоза ТКО: в 2020 году больше на 20% по сравнению с 2017 годом, хотя некоторые полигоны исключены из реестра и попали в программу рекультивации. Например, существующий с 1974 года объект старая городская свалка г. Белгород, где накопилось много отходов и воздействие на окружающую среду имеет определенные риски. В отношении полигона начата процедура рекультивации свалки. После ликвидации полигона требуется восстанавливать нарушенный покров, разрабатывать мероприятия биологической рекультивации земель свалки, формировавшихся более пятидесяти лет, и окружающих свалку территорий. Разрабатываемые мероприятия должны соответствовать и зависеть от исходного состояния территории свалки, структуры и физико-химического состава «тела» свалки [5].

Цель нашей работы – это изучение физико-химических свойств техногенного

грунта полигона ТКО с оценкой воздействия на окружающую среду.

Материал и методы исследования

Изучение физико-химических свойств техногенного грунта полигона ТКО старой городской свалки города Белгород осуществлялось в рамках инженерно-экологических изысканий с целью проведения рекультивации данной территории и установления возможности ее дальнейшего использования. Схема расположения свалки представлена на рис. 1. Общая площадь свалки – 152 030 м² (15,203 га), а площадь «замороженного» земельного участка для рекультивации составляет 160 766 м² (16,0766 га). Объем накопления свалочных масс за период существования данного ТКО составляет 2 342 855,52 м³ или около 468 571,10 тонн. Мощность и толщина свалочного тела из-за длительного более пятидесятилетнего неорганизованного накопления отходов на всей территории участка разная, хотя однотипная с остатками и боем кирпича, стекла, щебня, кусков керамики и пластика, древесины, бумаги, картона, технических резиновых изделий, металлического лома, кожи, мусора общественных зданий и пищевых отходов.



Рис. 1. Схема расположения городской свалки г. Белгород



Рис. 2. Внешний вид панорамы старой городской свалки г. Белгород

Заполнителями свалочного тела являются смесь песка разномерного и суглинок от твердой до тугопластичной консистенции. Внешний вид панорамы старой городской свалки представлен на фотографии (рис. 2).

Исследования физико-химических и биологических свойств техногенного грунта полигона накопленного вреда осуществлялись при отборе образцов вскрытых скважин мощностью от 1,5 до 20 м. Отбор образцов, их консервация и хранение, транспортировка и испытания осуществлялись в грунтово-химической лаборатории ООО «Мосгеопроект». Исследования проводили согласно методам испытания по ГОСТ 25100-2011, ГОСТ 20522-2012, ГОСТ 22584-95, ГОСТ 24143-95, ГОСТ 12071-2014, ГОСТ 12248-2010, ГОСТ 12536-2014, ГОСТ 5180-2015, ГОСТ 30416-2012, СП 28.13330.2012, МУ по санитарно-микробиологическому исследованию почвы № 2293-81, МУК 4.2.2661-10 и МУ2.1.7.2657-10.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведения исследований по совокупности факторов инженерно-геологические условия изучаемой площадки полигона ТКО можно отнести ко II категории сложности (СП 47.13330.2016). II класс полигона подтверждает усредненное содержание органической составляющей в отходах техногенного груза – 51,1%. Определено содержание жироподобных (1,2%), углеводородных (6,0%), белковых веществ (3,9%) и органической составляющей (40,0%) в отходах со средней влажностью 15,2%.

Установлено, что грунты на обследованной территории полигона ТКО в газогеохимическом отношении в соответствии с СП 47.13330.2012 относятся к категории «безопасные», то есть с невысоким содержанием взрывоопасных газов метана и водорода (табл. 1).

Таблица 1

Газохимическая характеристика свалочного грунта

Объемная доля компонентов, %	Степень газохимической опасности грунта			
	Безопасные	Потенциально опасные	Опасные	Пожаро- и взрывоопасные
Метан (CH ₄)	0,01 – 0,1	0,1 – 1,0	>1,0	>5,0
Диоксид углерода (CO ₂)	1,0 – 5,0	1,0 – 5,0	>5,0	>10,0
Водород (H ₂)	<0,1	<0,1	>0,1	>4,0
Кислород (O ₂)	>18,0	<18,0	<18,0	<18,0

Таблица 2

Компонентный состав биогаза полигона ТКО

Номер кода	Компонентный состав биогаза	С вес., %	С, мг/м ³	г/с	т/год
0410	Метан	52,915	660908	15,45114	223,3769
0621	Толуол	0,723	9029	0,211143	3,052143
0303	Аммиак	0,533	6659	0,155571	2,25
0616	Ксилол	0,443	5530	0,129286	1,870143
0337	Оксид углерода	0,252	3148	0,073571	1,063857
301	Азота диоксид	0,111	1392	0,032429	0,468571
0380	Диоксид углерода	44,736	558958	13,06292	188,8504
1325	Формальдегид	0,096	1204	0,028	0,405286
0627	Этилбензол	0,095	1191	0,014571	0,401
0330	Ангидрид сернистый	0,070	878	0,020429	0,295571
0333	Сероводород	0,026	326	0,007571	0,109714

Грунтовый воздух находится в незаполненных водой порах грунта и составляет 25–60% от объема грунта. Газовый состав грунтового воздуха включает диоксид углерода, метан, кислород, водород, газообразную воду и разные летучие органические соединения, образующиеся в результате множества протекающих в грунте химических и биохимических процессов. Между грунтовым воздухом и атмосферой постоянно осуществляется газообмен, и его направление зависит от плотности сложения грунта и от избыточной увлажненности.

Аэробные грунтовые микроорганизмы в неуплотненном грунте активно поглощают кислород и выделяют углекислый газ в атмосферу. Если же в результате длительного формирования объекта накопленного вреда техногенный грунт имеет плотное сложение, в нем начинают развиваться анаэробные микроорганизмы, приводящие к образованию метана, сероводорода, аммиака и других газов, которые становятся источниками загрязнения окружающей среды. Выделяющийся из свалочного тела газ – биогаз имеет сложный компонентный состав. Компонентный состав биогаза полигона ТКО старой городской свалки города Белгород представлен в таблице 2.

Данные таблицы 2 демонстрируют, что компонентный состав биогаза полигона ТКО старой городской свалки города Белгород разнообразен и прежде всего представлен метаном и диоксидом углерода. Установлено, что концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе района исследований не превышают значений

1,0 ПДК. Расчеты показывают, что теоретически количество загрязняющих окружающую среду веществ разной степени опасности, которые могут быть выделены из тела свалки, значительно и потенциально составляет для метана – более 200 т/год; для углекислого газа – около 200 т/год; для толуола, ксилола и аммиака – 2–3 т/год; для формальдегида и этилбензола – около 0,5 т/год; для сероводорода и сернистого ангидрида – 0,1–0,3 т/год. С другой стороны, рассчитанные максимальные приземные концентрации загрязняющих веществ на границе с селитебной зоной не превышают 1,0 ПДК. Итак, в результате пятилетней рекультивации исследуемого участка прогностически не ожидается негативного влияния на окружающую среду селитебной зоны, и потенциальные риски воздействия на здоровье человека отсутствуют.

Накопление в почвогрунтах органических загрязнителей, таких как нефтепродукты и бенз(а)пирен, оказывает на них и прямое, и косвенное биохимическое воздействие [6; 7].

В таблице 3 представлены результаты характеристики загрязнения свалочного грунта полигона ТКО старой городской свалки г. Белгород органическими загрязнителями. Данные таблицы показывают, что степень загрязнения грунтов нефтепродуктами и бенз(а)пиреном свалочного грунта полигона ТКО старой городской свалки города Белгород – допустимая. Пороговая концентрация допустимого уровня загрязнения нефтепродуктами составляет 1000 мг/кг грунта.

Таблица 3

Характеристика загрязнения свалочного грунта полигона ТКО

№ п/п	Глубина отбора пробы, м	pH _{KCL}	Нефтепродукты, мг/кг	Бенз(а)пирен, мг/кг
1	0,0 – 0,2	7,85 – 8,60	923,0 – 929,0	0,005
2	4,0 – 5,0	7,87 – 8,62	8,7 – 14,2	0,005
3	10,0 – 11,0	8,82 – 9,57	7,5 – 13,0	0,005
4	15,0 – 16,0	8,84 – 9,59	6,5 – 12,0	0,005
5	19,0 – 20,0	7,93 – 8,68	5,7 – 11,2	0,005

Таблица 4

Средняя валовая концентрация ТМ в свалочном грунте полигона ТКО, мг/кг

№ п/п	Глубина отбора пробы, м	Ni	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg
1	0,0 – 0,2	23,70	41,90	45,10	4,63	0,05	0,005
2	4,0 – 5,0	6,23	3,28	21,59	3,56	0,05	0,005
3	10,0 – 11,0	6,05	3,22	20,96	2,72	0,05	0,005
4	15,0 – 16,0	5,90	3,17	20,34	2,02	0,05	0,005
5	19,0 – 20,0	5,58	3,13	19,92	1,46	0,05	0,005

Установлено, что наибольшее количество остатков нефтепродуктов аккумулировано на поверхности свалочного грунта и на глубине 0–0,2 м составляет 0,9 ПДУ. Далее с глубины 4,0 м до 20,0 м количество нефтепродуктов резко снижается и равно в среднем 0,006–0,02 ПДУ. В отношении бенз(а)пирена в грунте норматив ПДК составляет 0,02 мг/кг. Установлено, что содержание бенз(а)пирена в изучаемом свалочном грунте незначительное и составляет 0,25 ПДК. Итак, допустимый уровень содержания органических загрязнителей нефтепродуктов и бенз(а)пирена в свалочном грунте полигона ТКО может служить основой для прогнозной оценки использования рекультивируемой территории старой городской свалки города Белгород.

При определении степени агрессивности техногенного грунта старой городской свалки установлено, что все грунты зоны аэрации по степени засоленности характеризуются как незасоленные; степень агрессивности сульфатов и хлоридов грунтов – отсутствует. Согласно авторам [8], ионы металлов в почвогрунте могут содержаться в виде солей карбонатов, галогенидов, сульфатов и сульфидов, то есть как в растворимой, так и нерастворимой форме. Средняя валовая концентрация тяжелых металлов (ТМ) в свалочном грунте полигона ТКО представлена в таблице 4.

Данные таблицы показывают, что максимальное количество ТМ, таких как никель, медь, цинк и свинец, обнаружено в поверхностном слое свалочного грунта до глубины 0,2 м. Затем на глубине 4,0–20,0 м их количество существенно уменьшается. В отношении кадмия и ртути можно заключить, что их количество невысокое и относительно постоянное на разной глубине отбора пробы свалочного грунта. Отметим, что в СанПиН 2.1.7.1287-2003 рекомендуется оценивать химическое загрязнение грунтов по суммарному показателю химического загрязнения, являющемуся индикатором неблагоприятного воздействия на здоровье населения. Согласно расчетам по показателям таблицы 4 оценка суммарной концентрации химического загрязнения свалочного грунта на глубине до 20 метров ТМ характеризует категорию загрязнения свалочного грунта полигона ТКО старой городской свалки как «чистая».

Установлено, что грунт площадки полигона ТКО имеет допустимую степень токсичности образца. Индекс токсичности меньше 20, что говорит о безвредности грунта для человека, млекопитающих и птиц. В аккредитованной испытательной лаборатории центра ООО «ЦСЭМ «Московский» были проведены биологические испытания образцов свалочного техногенного грунта. Микробиологическая характе-

ристка грунта объекта накопленного вреда включала определение содержания общих колиформных и термотолерантных бактерий, возбудителей кишечных инфекций, обнаружение жизнеспособных яиц гельминтов, онкосфер тениид (яйца с личинками ленточных червей) и жизнеспособных цист патогенных кишечных простейших. В результате исследований установлено, что исследуемые образцы свалочного грунта относятся к категории чистых грунтов. Микробиологическая характеристика свалочного грунта представлена в таблице 5.

На изучаемой территории встречаются зоны сорной рудеральной растительности (лопух, полынь, крапива, лебеда, хвощ, сурепка и другие). Фауна рекультивируемой территории и прилегающих к участку земель представлена двумя комплексами: фаунистическим комплексом из синантропных видов селитебной территории и агрогенным фаунистическим комплексом, сформированным под влиянием агротехнических и агрохимических фак-

торов. Животный мир в видовом отношении объекта рекультивации очень скуден и представлен в основном мышевидными грызунами.

В таблице 6 представлены данные компонентов грунта полигона ТКО. По результатам лабораторного анализа, грунт на площадке изысканий характеризуется средним плодородием. Поэтому для восстановления плодородия и структурного состояния субстрата полигона ТКО потребуются дополнительное внесение удобрений и высев многолетних бобовых и злаковых трав.

В процессе рекультивации надо будет наносить плодородный слой почвы с высоким содержанием гумуса и обладающий благоприятным для роста растений химическими, физическими и биологическими свойствами. Биологический этап рекультивации позволит восстановить растительный покров на рекультивируемом объекте. Общий срок наблюдений после завершения этапа биологических рекультивационных мероприятий составляет не менее 5 лет.

Таблица 5

Микробиологическая характеристика свалочного грунта

Показатели	Ед. измер.	Норма НДК (ПДК)	Результаты испытаний, номер образца			Методы испытаний
			1	2	3	
Группа бактерий кишечной палочки, индекс	КОЕ* в 1 г	1–9 – чистая, 10–100 – умеренно опасная	<1,0	<1,0	<1,0	МУ 2293-81 (Методические указания по санитарно-микробиологическому исследованию почвы)
Патогенные микроорганизмы	В 50 г	Не доп. для чистой	Не обнар.	Не обнар.	Не обнар.	
Энтерококки	КОЕ в 1 г	1–9 – чистая, 10 и выше – загрязненная	Не обнар.	Не обнар.	Не обнар.	
Яйца и личинки гельминтов. Цисты простейших.	экз./кг	Не доп.	не обнар.	не обнар.	не обнар.	МУК 4.2.2661-10 (Методические указания «Методы санитарно-паразитологических исследований») МУ 2.1.7.2657-10 (Методические указания «Энтомологические методы исследования почвы населенных мест на наличие преимагинальных стадий синантропных мух»)
Личинки и куколки синантропных мух	экз., в почве с площади 20×20 см	0 – чистая	не обнар.	не обнар.	не обнар.	

Примечание: * число КОЕ – колониеобразующих единиц.

Таблица 6

Содержание компонентов
в грунте полигона ТКО

Компоненты	Содержание компонентов на 100 г абсолютно сухого грунта		
	мг	мг-экв.	%
Анионы			
HCO ₃ ⁻	29,33	0,48	0,02933
Cl ⁻	4,06	0,11	0,00406
SO ₄ ⁻²	24,58	0,51	0,02458
Катионы			
Ca ⁺²	8,04	0,40	0,00804
Mg ⁺²	3,47	0,29	0,00347
Na ⁺ +K ⁺	9,43	0,41	0,00943
NH ₄ ⁺	-	-	-

При разработке мероприятий на рекультивируемой территории объекта накопленного вреда в соответствии с «Земельным кодексом РФ» нарушенные почвы и земельные участки требуется переводить в состояние, пригодное для дальнейшего использования по назначению. Поэтому для повышения плодородности почвенного субстрата необходим дополнительный привоз здоровой почвы и закрепление субстрата посевом многолетних злаково-бобовых трав. Из многолетних трав рекомендуются смеси следующего состава: клевер белый, овсяница луговая, донник белый и люцерна желтая. Подбор растений для формирования ландшафтной композиции рекультивируемого участка должен соответствовать фитоценотическим, декоративным и экологическим принципам. С учетом региональных особенностей для Белгородской области рекомендуется следующее сочетание растений: дуб как основная древесная порода; липа и кустарники (боярышник колючий, или обыкновенный) как сопутствующие культуры. Для облагораживания и озеленения территории потребуется около 800 штук саженцев дуба, около 400 штук саженцев липы и 3000 штук саженцев кустарника. Ожидается, что после проведения этапа биологической рекультивации исследуемый участок объекта накопленного вреда старой городской свалки г. Белгород

будет представлять собой приятную эстетически и благоустроенную территорию с террасированными задернованными склонами, преобразованную в соответствии с принципами рационального использования земельных ресурсов и с принципами охраны почв. Установлено, что после завершения всех работ и мероприятий остаточное воздействие объекта накопленного вреда старой городской свалки г. Белгород не будет превышать уровень допустимой антропогенной нагрузки на природные компоненты окружающей среды.

Заключение

При выполнении рекультивации земельного участка объекта накопленного вреда старой городской свалки г. Белгород не прогнозируемые негативные последствия на окружающую среду отсутствуют. В период выполнения работ для снижения неблагоприятных техногенных последствий на окружающую среду рекомендуется разработать дополнительные агротехнические мероприятия, улучшающие свойства почвы.

Список литературы

1. Бенин Д.М., Маркова Е.С. Негативное воздействие ТКО на окружающую среду при складировании на объектах захоронения отходов // Инновации. Наука. Образование. 2020. № 18. С. 267–277.
2. Говорушко С.М., Лазарев С., Петухов В.И., Зелинская Е.В. Обращение с твердыми коммунальными отходами: Россия на фоне мира // Астраханский вестник экологического образования. 2021. № 2 (62). С. 4–31.
3. Лукашов С.В., Иванченкова О.А. Анализ состояния почвогрунтов урбанизированной территории как элемент инженерно-экологических изысканий // Успехи современного естествознания. 2020. № 5. С. 56–62.
4. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2021. 864 с.
5. Бабина Ю.В. Эксплуатация, закрытие и рекультивация полигонов ТКО // Твердые бытовые отходы. 2019. № 12(162). С. 34–38.
6. Лукашов С.В., Надточей Е.П., Иванченкова О.А. Определение остаточных количеств нефтепродуктов и водорастворимых минеральных загрязнителей в почвогрунтах урбанизированных территорий // Успехи современного естествознания. 2021. № 3. С. 65–71.
7. Кирейчиков И.В., Унжаков В.В., Маслов Д.И. Органика на полигоне вредное воздействие и как его избежать // Твердые бытовые отходы. 2021. № 10 (184). С. 18–22.
8. Каплина С.П., Семенова М.В., Дзюба К.С., Андронов С.В., Каманина И.З., Старостина И.А. Твердые коммунальные отходы как вторичные материальные ресурсы (на примере города Дубна Московской области) // Успехи современного естествознания. 2018. № 2. С. 93–98.

УДК 55:519.63:536.24

**СРАВНЕНИЕ КОНЕЧНО-РАЗНОСТНЫХ СХЕМ
ДЛЯ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ
МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ГЛЯЦИОЛОГИЧЕСКИХ
И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

^{1,2}Попов С.В., ^{2,3}Боронина А.С., ²Немчинова А.В.

¹Полярная морская геологоразведочная экспедиция, Санкт-Петербург,
e-mail: spopov@yandex.ru;

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург,
e-mail: nemchinova02@mail.ru;

³Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург,
e-mail: al.b.s@yandex.ru

В настоящее время математическое моделирование является одним из основных способов изучения природных процессов, происходящих под ледником и в его толще. Современные модели, основанные на уравнениях математической физики, весьма сложны и решаются численно. Основная цель настоящей работы заключается в сравнении нескольких способов решения уравнения теплопроводности для двух сред: лёд и вода. Выбор этого уравнения обусловлен тем, что именно дифференциальные уравнения второго порядка составляют основу многих гляциологических и гидрологических моделей. В статье рассмотрено решение аналитическим методом, а также с использованием нескольких конечно-разностных схем: явной, неявной и Кранка-Николсона. По результатам исследования были проанализированы характерные особенности каждого из методов решения одномерной нестационарной задачи теплопроводности. Получены распределения температур в двух рассматриваемых средах и оценена степень сходимости между аналитическим и численными решениями путём вычисления и анализа среднеквадратических отклонений. Выполнены имитационные расчёты при различных критериях Куранта. Настоящее исследование показало, что для достижения приемлемой точности моделирования, которая оправдана с позиций технических характеристик используемой аппаратуры, имеет смысл задавать интервалы дискретизации по времени от 10 минут до одного часа и подбирать количество точек дискретизации по плановым координатам таким образом, чтобы число Куранта лежало в пределах от 0,05 до 0,1. Согласно полученным расчётам, при малых значениях числа Куранта точность явной конечно-разностной схемы выше остальных. Однако она резко падает при числе Куранта более 0,1, а при 1 становится неустойчивой. Следующей по точностным характеристикам является конечно-разностная схема Кранка-Николсона. Она более предпочтительна по сравнению с неявной схемой, но при указанных параметрах это не имеет большого значения.

Ключевые слова: уравнение теплопроводности, явная и неявная разностные схемы, схема Кранка-Николсона, аналитическое решение, математическое моделирование

**COMPARISON OF FINITE DIFFERENCE SCHEMES
FOR THEIR APPLICATION IN THE FORMULATION
OF MATHEMATICAL MODELS
OF GLACIOLOGICAL AND HYDROLOGICAL PROCESSES**

^{1,2}Popov S.V., ^{2,3}Boronina A.S., ²Nemchinova A.V.

¹Polar Marine Geosurvey Expedition, St. Petersburg, e-mail: spopov@yandex.ru;

²Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, e-mail: nemchinova02@mail.ru;

³State Hydrological Institute, St. Petersburg, e-mail: al.b.s@yandex.ru

Currently, mathematical modelling is one of the main methods for studying natural processes occurring under the ice sheet and in its thickness. Present models based on the the equations of mathematical physics are complex and are solved using numerical methods. The main purpose of this work is to compare several methods for solving the heat equation for two media: ice and water. The choice of this equation is because second-order differential equations form the basis of many glaciological and hydrological models. The article considers the solution of the heat equation by the analytical method, as well as using several finite difference schemes: explicit, implicit and Crank–Nicolson. The result of the study was an analysis of the characteristic features of each method for solving a one-dimensional non-stationary problem of heat conduction. We have obtained the temperature distributions in the two considered media and estimated the degree of convergence between the analytical and numerical solutions by calculating the standard deviations. Simulations under various Courant condition were performed. The present study showed that in order to obtain acceptable simulation accuracy, it is necessary to set sampling intervals in time from 10 minutes to one hour and select the number of sampling points in distance so that the Courant condition is in the range from 0,05 to 0,1. According to the obtained calculations, the accuracy of the explicit scheme is higher than the others for a small Courant condition. However, the accuracy decreases significantly when the Courant conditions are greater than 0,1. If the Courant condition is greater than 1, then the scheme becomes unstable. The next most accurate is the Crank–Nicolson method. Its use is more preferable, but with the specified parameters, it does not matter.

Keywords: heat equation, explicit and implicit difference schemes, Crank–Nicolson method, analytical solution, mathematical modelling

Изучение множества природных процессов, особенно происходящих под ледниковым покровом и в его толще, практически невозможно выполнить *in situ*. Прямые измерения либо чрезвычайно сложны и дорогостоящи, либо вовсе технически неосуществимы на современном этапе развития. В связи с этим единственным способом изучения процессов, протекающих в этих средах, а также прогнозирования их состояния в будущем является математическое моделирование. Именно по этой причине ещё на заре планомерного изучения труднодоступных полярных регионов начали создаваться первые математические модели, в том числе динамики ледниковых покровов и процессов, происходящих на их ложе. Несмотря на простоту и большое количество допущений в этих моделях, все они имели в своей основе фундаментальные законы, выраженные через уравнения математической физики. Впоследствии, по мере широкого внедрения компьютерной техники, математические модели постепенно усложнялись [1-3] и обретали формы компьютерных программ. Однако применительно к оценке субгляциальных процессов они всё также основывались на решении фундаментальных уравнений переноса и теплопроводности. Единственность решения достигалась путём задания начальных и граничных условий (краевая задача). По понятным причинам даже наиболее простые модели не могут быть решены аналитически и реализуются лишь численными методами.

В настоящее время имеется множество методов численного решения уравнений математической физики, которые сводятся к интегрированию посредством применения различных конечно-разностных схем. Однако они, как и все приближённые методы вычислений, имеют свои недостатки. Имеется ряд работ, в которых с позиций математики обсуждаются те или иные аспекты различных конечно-разностных схем. В этом направлении много работал академик Александр Андреевич Самарский, создатель Всесоюзного центра математического моделирования и основоположник теории конечно-разностных схем в нашей стране. Его учебник [4] стал классическим. В последующих работах анализировались уже более узкие вопросы. В них рассматривались проблемы влияния шага по пространственным координатам на точность аппроксимации уравнений теплопроводности, устойчивости разностных уравнений теплопроводности и прочее [5; 6]. Однако рекомендации в этих

работах достаточно общие и при несомненных положительных качествах не дают полного представления о том, как именно будут различаться решения, полученные при применении разных конечно-разностных схем.

В рамках настоящего научного исследования выполнено сравнение аналитического и численного решений (по нескольким конечно-разностным схемам) уравнения теплопроводности для выяснения того, какие параметры конечно-разностных схем являются оптимальными для моделирования процессов в двух средах: вода и лёд. Выбор уравнения теплопроводности связан с тем, что именно дифференциальные уравнения второго порядка составляют основу многих математических моделей развития ледников и процессов в подледниковых водоёмах [2; 7; 8].

Материалы и методы исследования

Постановка задачи

Для сравнения результатов будем решать одномерную задачу об изменении температуры θ с течением времени t в некотором безграничном, однородном и изотропном слое толщиной L с неизменным коэффициентом теплопроводности ζ . Его удобнее представить через a^2 , $\zeta \equiv a^2$. На обеих поверхностях (границах) слоя зададим граничные условия Дирихле (первого рода), которые предполагают неизменность температуры с течением времени на левой и правой границах θ_L и θ_R соответственно. Начальное распределение температуры также будем считать постоянным по всему слою и равным θ_0 . Совместим начало оси абсцисс с его левой границей, а правый будем ориентировать в сторону возрастания значений переменной x . Тогда математическая формулировка задачи примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} &= a^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}, \\ \theta(t, x)|_{x=0} &= \theta_L, \\ \theta(t, x)|_{x=L} &= \theta_R, \\ \theta(t, x)|_{t=0} &= \theta_0. \end{aligned} \quad (1)$$

Для сравнения результатов, полученных при использовании разных конечно-разностных схем, граничные, а тем более начальные, условия принципиального значения не имеют и не нарушают общности решения, поскольку всегда могут быть сведены к ним путём замены переменных.

*Аналитическое решение
задачи теплопроводности*

Задача в постановке (1) может быть решена аналитически, т.е. с получением точного решения, с которым и будут сравниваться все остальные. Для этого воспользуемся методом Фурье (разделения переменных). Однако он годится лишь при соблюдении нулевых граничных условий [9]. Чтобы этого достичь, введём новую переменную φ ,

$$\varphi(t, x) = \theta(t, x) - \left[\theta_L + \frac{x}{L}(\theta_R - \theta_L) \right].$$

В этом случае краевая задача (1) примет вид

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}, \quad \varphi(t, x) \Big|_{x=0} = 0, \quad \varphi(t, x) \Big|_{x=L} = \theta_0 - \theta_L - \frac{x}{L}(\theta_R - \theta_L) = \varphi(0, x).$$

Аналитическое решение этого уравнения известно [9]:

$$\varphi(t, x) = \frac{2}{L} \sum_{k=1}^{\infty} \exp \left\{ - \left(\frac{\pi a k}{L} \right)^2 t \right\} \sin \left(\frac{\pi a k}{L} x \right) \times \int_0^L \varphi(0, x) \sin \left(\frac{\pi a k}{L} x \right) dx.$$

Выполнив переход к прежней переменной θ , получим окончательное аналитическое решение уравнения (1) с ненулевыми начальными и граничными условиями:

$$\theta(t, x) = \theta_L + \frac{x}{L}(\theta_R - \theta_L) + \frac{2}{L} \sum_{k=1}^{\infty} \exp \left\{ - \left(\frac{\pi a k}{L} \right)^2 t \right\} \sin \left(\frac{\pi a k}{L} x \right) \times \int_0^L \left[\theta_0 - \theta_L - \frac{x}{L}(\theta_R - \theta_L) \right] \sin \left(\frac{\pi a k}{L} x \right) dx. \quad (2)$$

Несмотря на то что *точное решение* уравнения теплопроводности найдено, его нельзя представить в виде конечной комбинации элементарных функций. В этом смысле решение всё же является приближённым, но, при использовании большого количества членов разложения в ряд, оно практически совпадёт с точным. Таковым его и будем считать.

*Численное решение с применением
явной конечно-разностной схемы*

Четырёхточечная явная конечно-разностная схема, шаблон которой представлен на рис. 1а, является наиболее простой численной реализацией уравнения теплопроводности. Если N – это количество точек по толщине слоя, в которых осуществляется поиск решения задачи, то расстояние Δx между ними при использовании равномерной сетки составляет $\Delta x = L/(N-1)$. Тогда, возвращаясь к коэффициенту теплопроводности ζ , для вычисления значения температуры в n -й точке на j -м временном шаге θ_n^{j+1} может быть использовано соотношение

$$\frac{\theta_n^{j+1} - \theta_n^j}{\Delta t} = \zeta \frac{\theta_{n+1}^j - 2\theta_n^j + \theta_{n-1}^j}{\Delta x^2},$$

где Δt – шаг по времени [6; 10]. Таким образом, искомая величина θ_n^{j+1} :

$$\theta_n^{j+1} = \theta_n^j + \zeta \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (\theta_{n+1}^j - 2\theta_n^j + \theta_{n-1}^j). \quad (3)$$

При всей простоте явной схемы (3) у неё имеется существенный недостаток. Он заключается в выполнении необходимого условия устойчивости – т.н. *критерия Куранта*. Его смысл заключается в том, что расчётная схема не может корректно обсчитывать распространение возмущения, которое в реальности происходит быстрее, чем предусмотрено вычислительной схемой. Таким образом, шаг по времени должен быть меньше некоторого порогового значения, иначе результаты расчётов становятся неверными либо получаются с большой ошибкой. Если *число Куранта* k , $k \equiv 2\zeta\Delta t/\Delta x^2$, то обсуждаемая схема является устойчивой при $k < 1$ [6; 10]. Несмотря на этот нюанс, всё равно рассмотрим результаты, полученные при её использовании.

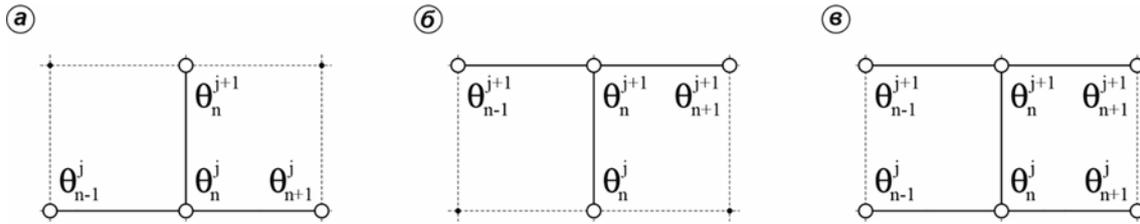


Рис. 1. Шаблоны конечно-разностных схем: явная (а), неявная (б), Кранка-Николсона (в)

Численное решение с применением неявной конечно-разностной схемы

Четырёхточечная неявная конечно-разностная схема, шаблон которой представлен на рис. 1б, является абсолютно устойчивой в n -й точке нашего столба воды на j -м временном шаге θ_n^{j+1} . Уравнение теплопроводности при этом может быть записано следующим образом [6; 10]:

$$\frac{\theta_n^{j+1} - \theta_n^j}{\Delta t} = \zeta \frac{\theta_{n+1}^{j+1} - 2\theta_n^{j+1} + \theta_{n-1}^{j+1}}{\Delta x^2}.$$

Если решение в предыдущем случае получается путём последовательных вычислений вдоль оси абсцисс, то в этом оно является результатом решения системы, состоящей из $N-2$ уравнений (4) и двух граничных условий. То есть оно получается сразу на всём временном слое, а не постепенно. Если решать её классическим методом Гаусса, то потребуется значительный объём памяти и вычислений. Имеется более перспективный подход, называемый *методом прогонки* [6; 10]. Неявная разностная схема абсолютно устойчива [6; 10; 11], т.е. решение имеется вне зависимости от числа Куранта. Это, безусловно, является важным достоинством неявной конечно-разностной схемы.

Численное решение с применением конечно-разностной схемы Кранка-Николсона

Рассмотрим ещё одну распространённую безусловно устойчивую шеститочечную конечно-разностную схему Кранка-Николсона. Её шаблон приведён на рис. 1в. Эта схема относится к классу схем с весами. Её идея заключается в более точном расчёте производных по плановым координатам, что, как следствие, при прочих равных условиях позволяет получить более точное решение [6; 10; 11]. Следуя [10], перепишем уравнение теплопроводности (1) в виде

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\zeta}{2} \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\zeta}{2} \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2},$$

а каждое из слагаемых правой части представим конечно-разностной схемой. При этом первое будем рассчитывать на временном слое j , а другое – на слое $j+1$. Тогда

$$\begin{aligned} \theta_n^{j+1} - \theta_n^j &= \frac{\kappa}{4} (\theta_{n+1}^{j+1} - 2\theta_n^{j+1} + \theta_{n-1}^{j+1}) + \\ &+ \frac{\kappa}{4} (\theta_{n+1}^j - 2\theta_n^j + \theta_{n-1}^j). \end{aligned}$$

Далее используется метод прогонки.

Результаты исследования и их обсуждение

Сравним результаты моделирования, выполненного с применением всех трёх рассмотренных выше конечно-разностных схем с точным аналитическим решением (2). Поскольку задача исследования заключается в выяснении оптимальных параметров для моделирования процессов в ледниках и в подледниковых водоёмах, то для определённости будем считать, что рассматриваемая среда – вода с коэффициентом температуропроводности $\zeta = 1,351 \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$. Пусть толщина слоя составляет 25 м. В начальный момент времени $\theta_0 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$; граничные условия постоянны: $\theta_L = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\theta_R = 0 \text{ }^\circ\text{C}$. Начальное распределение показано на рис. 2 (кривая 1).

Обратимся к рис. 3. На нём показаны графики среднеквадратичных отклонений σ численных решений от точных при различных интервалах времени Δt и постоянном количестве точек дискретизации N по толщине слоя, $N=500$. Это соответствует интервалу дискретизации $\Delta x=50 \text{ мм}$. Если $\tilde{\theta}_j$ и θ_j – аналитическое и численное решение в точке J соответственно, то σ может быть получено по известному статистическому соотношению

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{J=1}^N (\tilde{\theta}_J - \theta_J)^2 - \left[\frac{1}{N} \sum_{J=1}^N (\tilde{\theta}_J - \theta_J) \right]^2.$$

Как следует из представленных графиков, величина σ для первых расчётных значений достаточно высока. Затем она стремительно убывает по обратному экспоненциальному закону.

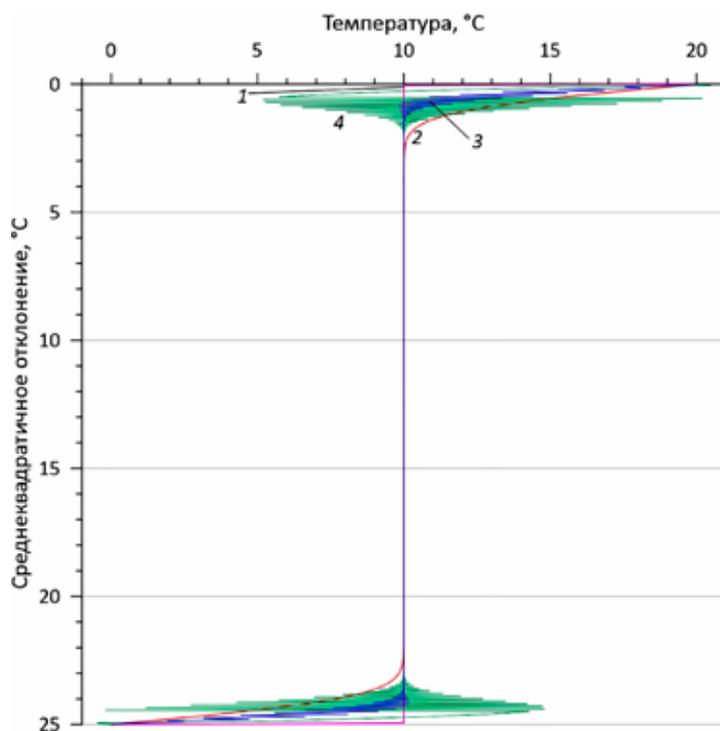


Рис. 2. Примеры модельных распределений температуры в слое воды толщиной 25 м, $\Delta x=50$ мм: 1 – начальное распределение; 2 – распределение температуры, смоделированное через 30 суток для схемы Кранка-Николсона при $\Delta t=10$ мин.; 3 – распределение температуры, смоделированное через 7 сут. 18 час. 40 мин. для явной схемы при $\Delta t=2$ час. 40 мин. ($\kappa=1,93$); 4 – то же, через 11 сут. 16 час

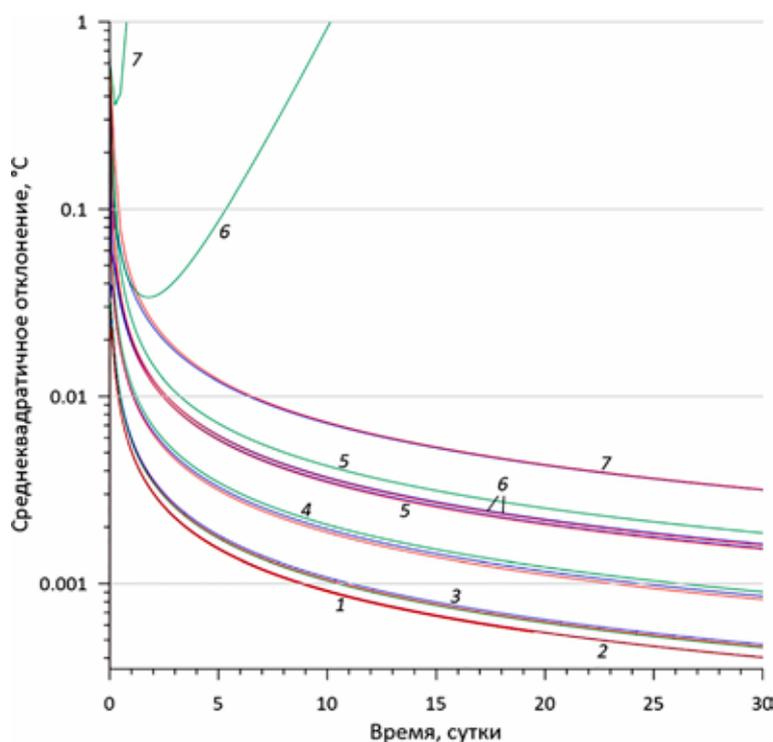


Рис. 3. Сравнение результатов моделирования для воды при $\Delta x=50$ мм: 1 – $\Delta t=10$ с, $\kappa=0,0010$; 2 – $\Delta t=1$ мин., $\kappa=0,0064$; 3 – $\Delta t=10$ мин., $\kappa=0,0645$; 4 – $\Delta t=1$ час, $\kappa=0,3875$; 5 – $\Delta t=2$ часа 30 мин., $\kappa=0,9690$; 6 – $\Delta t=2$ часа 40 мин., $\kappa=1,0336$; 7 – $\Delta t=6$ часов, $\kappa=2,326$. Синим цветом показаны кривые, построенные при использовании неявной конечно-разностной схемы, зелёным – явной, красным – Кранка-Николсона

Это связано с тем, что распределение температуры в начальный момент времени представляет собой сумму двух функций Хевисайда (рис. 2). Они, как известно, очень плохо описываются разложением в ряд Фурье, что требуется для аналитического решения (2), поскольку для практической реализации ряд не может состоять из бесконечного количества членов. Для построения решения авторы использовали разложение в ряд по 500 гармоникам. Таким образом, большие ошибки на этом временном интервале обусловлены исключительно недостатками описания аналитического решения. Но уже буквально после первых расчётных циклов начальное распределение чуть сглаживается, и численная реализация аналитического решения постепенно приближается к истинному. При этом величина ошибки σ уменьшается сразу примерно на полтора порядка (рис. 3). Судя по тому, что далее наблюдается вполне закономерная зависимость σ от числа Куранта, вклад ошибки реализации аналитического решения резко снижается, а ошибки интересующего нас численного решения – возрастает. В качестве примера на рис. 2 показано распределение температуры, наблюдаемое через 30 суток для схемы Кранка-Николсона при $\Delta t = 10$ мин. (кривая 2). Остальные решения не показаны, поскольку все они визуальнo совпадают друг с другом.

Расчётные кривые (рис. 3) показывают, что при использовании любой рассмотренной конечно-разностной схемы точность вычислений повышается с уменьшением Δt (и соответственным уменьшением числа Куранта). Это вполне закономерно, поскольку чем меньше интервал дискретизации по времени и по пространству, тем точнее вычисляются производные и, как следствие, точнее производятся расчёты посредством конечно-разностных схем. Исключение составляет явная схема, применение которой при числах Куранта $k > 1$ приводит к неустойчивому решению. Оно выражается в появлении гармонических флуктуаций, амплитуда которых постепенно нарастает. Скорость этого процесса возрастает с увеличением k . В качестве примера неустойчивое решение показано на рис. 2 (кривая 3). Оно рассчитано при $\Delta t = 2$ час. 40 мин. (что соответствует $k = 1,93$) и получено через 7 сут. 18 час. 40 мин. от начала моделирования. Кривая 4 на том же рисунке показывает ре-

зультат моделирования через 11 сут. 16 час. Как видно из представленных графиков, амплитуда вариаций достаточно быстро возрастает и в конечном итоге становится бесконечно большой. Увеличение флуктуаций сопровождается резким ростом величины общей ошибки σ , что наглядно демонстрируется на рис. 3 (кривые 6 и 7).

Если фиксировать N (т.е. Δx), то по мере роста числа Куранта убывание точности (т.е. рост σ) экспоненциально возрастает. Это наглядно демонстрируется группой графиков 1 на рис. 4. Таким образом, значения $k > 1$ хоть и не приводят к неустойчивому решению для неявной конечно-разностной схемы и схемы Кранка-Николсона, но делают результат менее точным. В частности, при увеличении числа Куранта с 1 до 10 ошибка σ возрастает примерно с $0,004$ °C до $0,03$ °C. При этом максимальные отклонения могут превышать эти значения на порядок и более. Это уже неприемлемо, поскольку указанные величины превышают точностные характеристики датчиков термокос [12].

Погрешность вычислений, достигаемая при $k = 0,06$, составляет менее $0,001$ °C, что вполне приемлемо для любых расчётов. Кроме того, этому значению k для воды соответствует интервал $\Delta t = 10$ мин. С позиций сбора термометрических данных этот интервал регистрации также оптимален, поскольку позволяет отследить с хорошей точностью не только сезонные, но и суточные колебания. С другой стороны, дальнейшее уменьшение k , а, следовательно, Δt , безусловно, улучшит результат (рис. 3, 4). Однако это повлечёт за собой существенное увеличение времени счёта. С другой стороны, графики на тех же самых рисунках показывают, что дальнейшее уменьшение интервала Δt не оправдывает достигаемой при этом точности вычислений. Таким образом, $k \approx 0,05$ можно считать оптимальным параметром для моделирования задач тепло-массообмена применительно к гидрологическим и гляциологическим расчётам.

Второй достаточно известный вывод, который следует из представленных рисунков, заключается в том, что конечно-разностная схема Кранка-Николсона в целом точнее неявной схемы. Однако расчёты показывают, что при $k < 0,1$ явная конечно-разностная схема становится более точной, хоть и ненамного. При $k < 0,01$ различий между всеми схемами практически не наблюдается.

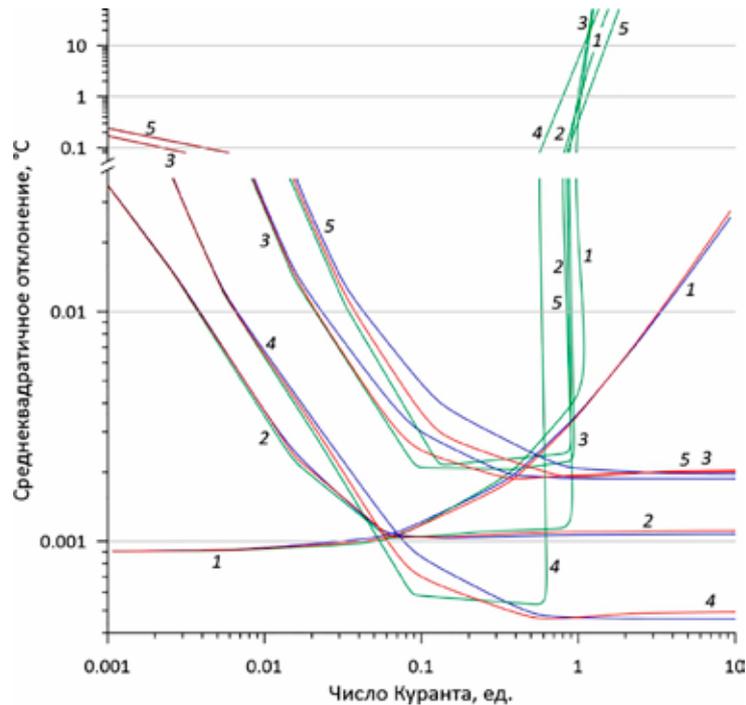


Рис. 4. Сравнение ошибок между аналитическим решением и решением по разным конечно-разностным схемам для сред вода и лёд на момент времени, равный 10 дням. Вода: 1 – $\Delta x=50$ мм, 2 – $\Delta t=10$ мин., 3 – $\Delta t=1$ час. Лёд: 4 – $\Delta t=10$ мин., 5 – $\Delta t=1$ час. Синим цветом показаны кривые, построенные при использовании неявной конечно-разностной схемы, зелёным – явной, красным – Кранка-Николсона

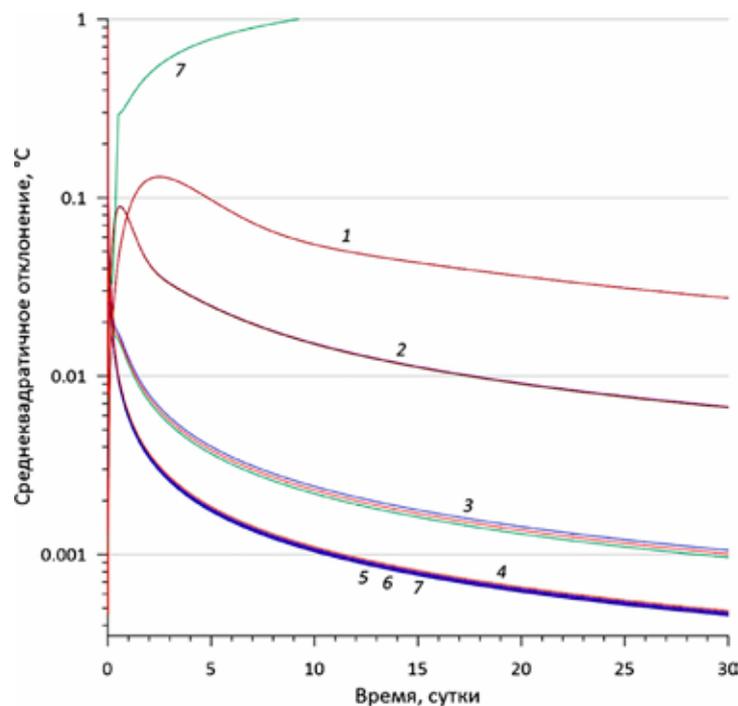


Рис. 5. Сравнение результатов моделирования для воды при $\Delta t=10$ мин.: 1 – $\Delta x=510,0$ мм, $\kappa=0,000622755$; 2 – $\Delta x=252,5$ мм, $\kappa=0,00254$; 3 – $\Delta x=100,4$ мм, $\kappa=0,01608$; 4 – $\Delta x=50,1$ мм, $\kappa=0,0646$; 5 – $\Delta x=33,4$ мм, $\kappa=0,1455$; 6 – $\Delta x=25,0$ мм, $\kappa=0,2589$; 7 – $\Delta x=12,5$ мм, $\kappa=1,036$. Синим цветом показаны кривые, построенные при использовании неявной конечно-разностной схемы, зелёным – явной, красным – Кранка-Николсона

Поскольку на число Куранта влияет не только Δt , но и Δx , проанализируем изменение этого параметра на точность получаемого результата. Для определённости сделаем это при $\Delta t=10$ мин., так как именно этому интервалу времени соответствует оптимальное число Куранта, согласно предыдущим оценкам. Зависимость погрешности вычислений σ от расчётного времени для воды показана на рис. 5. Как следует из представленных графиков, в данном случае наблюдается обратная закономерность: рост числа Куранта приводит к уменьшению погрешности. В целом это понятно, поскольку в данном случае происходит уменьшение интервала дискретизации по расстоянию, что приводит к улучшению точности определения производной по плановым координатам. Однако, начиная со значений $k=0,06$, значимого уменьшения σ не наблюдается (серия кривых 4, 5, 6 и 7). При этом, как и в предыдущем случае, при $k>1$ явная конечно-разностная схема становится неустойчивой. Таким образом, предложенную выше величину $k\approx 0,05$ можно считать оптимальной и в этом случае. На серии графиков 2 (рис. 4) представлено аналогичное сравнение точности результатов моделирования (величины σ), выполненного при использовании всех трёх конечно-разностных схем с аналитическим решением. Расчёты проведены при постоянном значении $\Delta t=10$ мин. Как следует из представленных графиков, наиболее точным решением (при условии его устойчивости) является то, которое получено при использовании явной схемы. Затем следует схема Кранка-Николсона и, наконец, неявная конечно-разностная схема. Приемлемая точность достигается также начиная с $k\approx 0,05$.

Попробуем увеличить интервал дискретизации по времени Δt с 10 минут до 1 часа, т.е. чуть ухудшим точность определения первой производной по времени и построим аналогичные графики. Они показаны серией кривых 3 на рис. 4. Предыдущая тенденция сохранилась: точность возрастает с ростом числа Куранта. Однако при этом закономерно возросла ошибка. При $k>0,3$ рост составил около 10%; при меньших значениях он гораздо больше, и при $k<0,1$ точность построений уже становится слишком низкой для каких-либо серьёзных оценок.

Поскольку планируется также моделирование субгляциальных гляциологических процессов, то логично произвести оценки не только для воды, но и для льда. Они

представлены сериями графиков 4 на рис. 4. Расчёты выполнены при аналогичных параметрах: толщина среды 25 м, $\Delta t=10$ мин., $\zeta=1,184\times 10^{-6}$ м²/с. Граничные и начальные условия уменьшены на 20 °С. Этим сохраняются относительные изменения, т.е. $\theta_L=-20$ °С, $\theta_R=0$ °С, $\theta_0=-10$ °С. Таким образом, эти построения по соотношению Δt и Δx аналогичны серии кривых 2 (рис. 4). Однако коэффициент теплопроводности ζ льда почти на порядок больше, чем у воды. Из графиков видно, что ход кривых 2 и 4 в целом сходный, и при k чуть менее 0,1 точностные характеристики серий становятся практически одинаковыми (кривые обеих серий пересекаются). При дальнейшем росте k точность построений для льда избыточно повышается и становится менее 0,001 °С. По мере приближения к значению $k=1$ точность построений для явной конечно-разностной схемы падает. При значениях k , близких к 0,5, её погрешность резко увеличивается, а затем решение становится неустойчивым.

На том же рисунке сериями кривых 5 показаны результаты аналогичных расчётов, полученные при $\Delta t=1$ час по аналогии с серией кривых 3 для воды. Несмотря на то что ζ сред отличается почти на порядок, кривые при малых k различаются не сильно. При $k>1$ эти серии кривых практически совпадают, за исключением нестабильных решений для явной конечно-разностной схемы.

Заключение

Для решения задач, которые основаны на уравнениях матфизики, параметры моделирования выбираются исходя из ожидаемых результатов. При этом современные модели, как правило, достаточно сложны и требуют значительных ресурсов и времени для расчётов. В этой связи выбор параметров для их минимизации с сохранением разумной точности является важной практической необходимостью, поскольку если точность избыточна, то ресурсы расходуются неоправданно, а скорость вычислений падает.

Настоящее исследование показало, что для достижения приемлемой точности, которая оправдана с позиций технических характеристик термодатчиков, имеет смысл задавать интервалы дискретизации по времени от 10 минут до одного часа и подбирать количество точек дискретизации по плановым координатам таким образом, чтобы число Куранта лежало в пределах от 0,05 до 0,1. Полученные расчёты показа-

ли, что при малых значениях числа Куранта точность явной конечно-разностной схемы выше остальных. Этот результат стал неожиданным для авторов. Следующей по точностным характеристикам идёт конечно-разностная схема Кранка-Николсона. Она более предпочтительна по сравнению с неявной схемой, но при указанных параметрах это не имеет большого значения. В принципе, если число Куранта не превысит значение 0,1, то вполне допустимо использование явной конечно-разностной схемы. Это существенно сэкономит ресурсы и увеличит время счёта. Вышеизложенное применимо к средам, коэффициенты теплопроводности которых находятся в интервале значений от 1×10^{-7} до 2×10^{-6} м²/с, что включает в себя лёд и воду.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ) в рамках проекта № 22-27-00266 «Разработка математической модели развития ледникового покрова с последующим применением для описания субгляциальных гидрологических процессов в районе подледникового озера Восток, Восточная Антарктида».

Список литературы

1. Постникова Т.Н., Рыбак О.О. Глобальные гляциологические модели: новый этап в развитии методов прогнозирования эволюции ледников. Часть 1. Общий подход и архитектура моделей // Лёд и Снег. 2021. Т. 61. № 4. С. 620–636. DOI: 10.31857/S2076673421040111.
2. Постникова Т.Н., Рыбак О.О. Глобальные гляциологические модели: новый этап в развитии методов прогнозирования эволюции ледников. Часть 2. Постановка экспериментов и практические приложения // Лёд и Снег. 2022. Т. 62. № 2. С. 287–304. DOI: 10.31857/S2076673422020133.
3. Sato T., Greve R. Sensitivity experiments for the Antarctic ice sheet with varied sub-ice-shelf melting rates. Ann. Glaciol. 2012. V. 53. No. 60. P. 221–228.
4. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977. 656 с.
5. Каримбаев К.Д., Рапилбекова Н.С. Численная оценка точности при пространственной дискретизации уравнений теплопроводности // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. Т. 11. №. 5-1. С. 138-143.
6. Гельфанд И.М., Локуциевский О.В. Метод прогонки для решения разностных уравнений / Введение в теорию разностных схем. М.: Наука, 1962. С. 238-309.
7. Кислина А.Е., Попов С.В. Опыт моделирования субгляциальных гидрологических процессов ледника Альдегонда, Шпицберген // Геологический Международный Студенческий Саммит: сборник материалов (Санкт-Петербург, 09 апреля 2022 года). СПб.: Первый ИПХ, 2022. С. 180–184.
8. Popov S. Ice cover, subglacial landscape, and estimation of bottom melting of Mac. Robertson, Princess Elizabeth, Wilhelm II, and western Queen Mary Lands, East Antarctica. Remote Sens. 2022. V. 14. № 1. P. 241. DOI: 10.3390/rs14010241.
9. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Том II. М.: Наука, 1974. 656 с.
10. Кольцова Э., Скичко А., Женса А. Численные методы решения уравнений математической физики и химии. М.: Юрайт, 2020. 220 с.
11. Лобаев А.Н., Вдовин С.И., Харитонов И.Ю., Богословская Н.М. Исследование уравнения теплопроводности с теплообменом на поверхности методом Кранка-Николсона // Национальная ассоциация ученых (НАУ). 2019. № 48/2019. Часть 3. С. 47-52.
12. Лебедева Л.С., Бажин К.И., Христофоров И.И., Абрамов А.А., Павлова Н.А., Ефремов В.С., Огонеров В.В., Тарбеева А.М., Федоров М.П., Нестерова Н.В., Макарьева О.М. Надмерзлотные субэдральные талики в бассейне реки Шестаковка (Центральная Якутия) // Криосфера Земли. 2019. Т. XXIII. № 1. С. 40–50. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-1(40-50).

УДК 004.9:528:631.1

ПРИМЕНЕНИЕ АГРОГИС ДЛЯ ОЦЕНКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ И РАЗРАБОТКИ АДАПТИВНО-ЛАНДШАФТНЫХ СИСТЕМ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

Сучков Д.К.

*Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций
и защитного лесоразведения Российской академии наук
(Лаборатория прогнозирования биопродуктивности агролесоландшафтов),
Волгоград, e-mail: suchkov1992@yandex.ru*

В рамках данной работы будут рассмотрены вопросы, появляющиеся в процессе формирования пространственных баз информации, необходимой для того, чтобы давать оценку земельным ресурсам, эксплуатируемым для целей сельского хозяйства. Таким образом, по итогам настоящей работы будут достигнуты результаты, позволяющие совершенствовать процесс формирования базы геоданных. Такая база предоставляет возможность создать геоинформационное обеспечение таких процессов, что реализуется в рамках составления характеристики для земель, применяемых в целях сельского хозяйства, а также в рамках формирования агроэкологической типизации данных земель. Кроме того, планируемые к достижению в работе результаты представляются интересными и с той точки зрения, что они могут быть применены в рамках формирования систем адаптивно-ландшафтного типа, эксплуатируемых в земледельческой деятельности. В рамках настоящей работы будет продемонстрировано наполнение баз данных, отличающихся по иерархическим уровням (то есть мы будем основываться как на базах данных локального уровня, так и на базах данных регионального уровня). В АгроГИС формируются базы информации, необходимые для сохранения, анализа, а также демонстрации пространственных сведений, характеризующих, в каком состоянии пребывают земли, выделенные для осуществления земледельческой деятельности. Такими базами могут выступать, например, картографические, археологические, почвенные и т.д. Данные базы отличаются друг от друга по тому, какие объекты в них исследуются, какая структура у них присутствует, какое у них содержание, каким методом структурируются те сведения, что в них представлены. Именно этим и обосновывается актуальность проведенных нами исследований. В данной работе представлено описание основных компонентов базы геоданных. Эти компоненты представляют собой совокупности пространственных классов. Также в тексте работы представлены данные, которые доказывают потребность в организации агрономических баз геоданных.

Ключевые слова: АгроГИС, пространственная база данных (база геоданных), сельскохозяйственные земли, технологии обработки, агрономическая геоинформационная система, большие данные (Big Data), облачные технологии

APPLICATION OF AGROGIS FOR AGRICULTURAL LAND ASSESSMENT AND DEVELOPMENT ADAPTIVE LANDSCAPE FARMING SYSTEMS

Suchkov D.K.

*Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation
and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences
(Laboratory for Forecasting the Bio-productivity of Agroforest Landscapes),
Volgograd, e-mail: suchkov1992@yandex.ru*

Within the framework of this work, issues arising in the process of forming spatial databases of information necessary to assess land resources exploited for agricultural purposes will be considered. Thus, based on the results of this work, results will be achieved that allow improving the process of forming a geodata database. Such a database provides an opportunity to create geoinformation support for such processes, which is implemented within the framework of drawing up characteristics for lands used for agricultural purposes, as well as within the framework of forming agroecological typification of these lands. In addition, the results planned to be achieved in the work are interesting from the point of view that they can be applied within the framework of the formation of adaptive landscape type systems used in agricultural activities. In the framework of this work, the filling of databases that differ in hierarchical levels will be demonstrated (that is, we will be based on both local-level databases and regional-level databases). In AgroGIS, databases of information are formed that are necessary for the preservation, analysis, and demonstration of spatial information characterizing the condition of the lands allocated for agricultural activities. Such databases can be, for example: cartographic, archaeological, soil, etc. These databases differ from each other in what objects are studied in them, what structure they have, what content they have, what method is used to structure the information that is presented in them. This is what justifies the relevance of the research that we conducted in the process of writing the work. This paper describes the main components of the geodata database. These components are aggregates of spatial classes. Also, the text of the work presents data that prove the need for the organization of agronomic geodata.

Keywords: AgroGIS, spatial database (geodata database), processing technologies, agronomic geoinformation system, Big Data, agricultural lands, cloud technologies

Сегодня в Российской Федерации существует острая потребность в том, чтобы заниматься созданием, а также совершенствованием научно-технологической инициативы (НТИ), для этого реализуется комплексная стратегия обеспечения науч-

но-технологического совершенствования [1]. НТИ выступает как необходимая с той точки зрения, что благодаря ее реализации можно проводить как фундаментальные, так и прикладные научные разработки. Результаты реализации НТИ благотворным образом сказываются на степени совершенства агропромышленного национального комплекса, приближая его к требованиям, установленным наилучшими мировыми стандартами. Для обеспечения развития аграрной деятельности можно пользоваться агрономическими ГИС, а также иными информационными технологиями [2]. Но для создания данных технологий, а также ГИС требуется произвести разрешение задач, сопряженных с информационным обеспечением создающихся баз данных. А для формирования данного обеспечения необходимо получать понимание того, какие природно-территориальные кондиции имеются на конкретных землях сельскохозяйственного назначения, какие факторы экологического характера имеются на данных землях. Базы данных (БД), которые создаются в рамках ГИС агрономического типа, реализуют функционал, связанный с сохранением пространственных сведений о ресурсах сельскохозяйственного назначения, с представлением данных сведений, а также с проведением анализа в их отношении [3, 4].

Цель работы заключается в том, чтобы сформировать структуру базы геоданных (для агрономической информационной системы), а также представить информацию о содержании такой базы данных.

Материалы и методы исследования

В рамках проведения настоящей работы был реализован объектно-функциональный подход, который может быть реализован за счет СУБД соответствующего типа. Благодаря данному подходу появляется возможность решать функциональные задачи таким образом, который в максимальной степени соответствует потребностям, обозначаемым эксплуатантами систем [5, 6].

Исследования были проведены для территории Волгоградской области. В рамках формирования пакета сведений, подлежащих внесению в базу геоданных, были применены разнообразные источники. Это, например, топографическая карта, составленная в масштабе 1:1000000, а также спутниковые снимки, подготовленные аппаратом Landsat-7 ETM+, Sentilel-2. Кроме того, были использованы данные статистических расчетов вместе с данными, полученными

по итогам литературного анализа. В рамках формирования базы геоданных были применены соответствующие технологии и методы БД.

Результаты исследования и их обсуждение

Формирование совокупности геоданных, подлежащих внесению в агрономические ГИС. Система пространственных объектов подлежит нахождению в таблицах БД, при этом данные таблицы являются атрибутивными. Что касается таких объектов, которые характеризуются присутствием одной и той же координатной системы, то они представляют собой такой класс объектов, что едины с точки зрения их тематического описания. Для составления тематической характеристики в отношении земельных ресурсов, выделенных для ведения сельскохозяйственной деятельности, необходимо описать, каким рельефом обладают данные земли, какой климат поддерживается на территориях, занимаемых данными землями, какие почвоформирующие породы присутствуют на данных землях. В сформированной концептуальной модели были определены сущности, соответствующие совокупности пространственных классов (рисунок).

Сущность *Климат* требуется для проведения анализа в отношении таких ресурсов, которые причисляются к категории агроклиматических. Здесь нужно сослаться на то, что климат – это фактор, оказывающий интенсивное влияние на то, в каких кондициях пребывают земли, выделенные для ведения сельскохозяйственной деятельности. В данной сущности присутствует несколько пространственных классов. Например, это метеостанции, а также классы, характеризующие агроклиматические параметры.

Сущность *Рельеф* применена в процессе описания геоморфологической специфики, присутствующей у изучаемого региона. Объекты, которые образуют рельеф территории, представлены в совокупности отличающихся типов данных. В совокупности они характеризуют рельеф с той точки зрения, какими компонентами он образован, какое геоморфологическое районирование в нем представлено. В рассматриваемой сущности присутствует несколько пространственных классов, которые также включают разнообразные информационные слои. Например, одним из пространственных классов, характеризующимся отношением к данной сущности, выступает такой, как высоты точек поверхности на Земле.



Логическая модель базы геоданных агрономической геоинформационной системы

Сущность *Геотопы* представляет собой отдельную совокупность пространственной информации. Геотопы имеют характер главной морфологической составляющей агроландшафта. Образование геотопов производится после того, как осуществляется геоморфологическое исследование (в собственную очередь, реализуемое посредством ГИС). Описание геотопов производится в соответствии с совокупностью количественных характеристик, которые описывают, в каком состоянии пребывает рельеф, климат территории, какие на ней присутствуют почвоформирующие породы.

Сущность *Группы земель* образуется по итогам проведения агроэкологической группировки, чьим объектом выступают

земли, используемые в целях сельского хозяйства. В соответствии с группировкой земли могут быть интерпретированы в качестве солонцовых, переувлажненных, эрозийных, а также иных.

Сущность *Почвы* необходима для того, чтобы свести в единую систему сведения о почвоформирующих породах, а также об основных характеристиках, присутствующих у почвенного покрова.

Сущность *Растительность* представлена совокупностью классов данных, которые представляют собой слои растительности. Такими слоями выступают, в частности, влаголюбивая растительность, кустарниковая растительность, а также древесная растительность.

Сущность *Гидрография* существует для того, чтобы ввести в базу геоданных информацию об объектах с гидрогеографическим статусом, присутствующим в пределах изучаемой территории. Кроме того, данная сущность является нужной и с той точки зрения, что ее применение обеспечивает геоинформационное моделирование поверхностного стока.

Сущность *ПСХР* является важнейшим компонентом геоинформационной характеристики модели. Она необходима для того, чтобы характеризовать, как граничат между собой разные зоны, пространства сельского хозяйства.

Те сущности, о которых велась речь выше в работе, могут быть применены, например, в процессе формирования БД, относящейся к локальному уровню. Чтобы сделать эксплуатацию БД в высшей степени эффективной, необходимо создавать структуру атрибутивных характеристик. В соответствии с данной структурой все эти характеристики будут разделены на уникальные, идентификационные, семантические, а также метрические. В таких характеристиках, которые могут быть интерпретированы в качестве уникальных, присутствует идентификатор (также именуется код) конкретного объекта. Такие характеристики необходимы с той точки зрения, что они осуществляют связь между объектом и тем классом, к которому он причисляется [7].

Сущность *Административное деление* является требуемой с той точки зрения, что ее эксплуатация необходима для идентификации административно-территориального отнесения какой-либо земли, выделенной для осуществления сельского хозяйства.

Интеграция БД и пространственных БД АгроГИС. Чтобы сделать АгроГИС более совершенной с точки зрения объема функциональных возможностей, присутствующих у нее, необходимо изменять методы взаимодействия, организуемого между базой данных и пользователем, обращающимся к ее ресурсам. Существует такой способ организации данного взаимодействия, для реализации которого применяется СУБД внутреннего типа. В этом случае пользователь системы применяет предлагаемый ему интерфейс, а также пользуется совокупностью предоставляемого ему функционала [8]. Такой подход характеризуется недостатком с той точки зрения, что он накладывает ограничения к информационной емкости, присутствующей у БД [9].

Во второй ситуации реализация БД производится через такие СУБД, которые уже являются известными. Она здесь понимается в качестве внешнего источника сведений для внутренней базы сведений, находящихся в ГИС. Что касается взаимодействия, организуемого между пользователем системы и самой базой геоданных, то оно обеспечивается специальным программным интерфейсом, работающим на основании стандарта ODBC. Такой стандарт в современных условиях поддерживается большим количеством актуальных ГИС. Среди преимуществ, которые могут быть получены по итогам применения рассматриваемого подхода, выделяются следующие. Во-первых, это наличие большого количества возможностей для совершенствования качества интеграции между ГИС и ИС, которая разрабатывается. Что же касается недостатков, имеющихся у подхода, то они заключаются преимущественно в том, что у пользователя могут сформироваться проблемы с точки зрения получения удаленного доступа к запрашиваемой им информации. Кроме того, ему приходится на постоянной основе инициировать взаимодействие с сервером БД [3, 6].

Наибольшей же степенью эффективности характеризуется последний, третий метод организации взаимодействия между пользователем и сведениями, находящимися на хранении в базе данных. Здесь мы упомянем о том, что в базе данных могут присутствовать как пространственные сведения, так и такие сведения, что не являются пространственными.

Представляется эффективным пользоваться облачными технологиями, которые обеспечивают доступ к информации. Данные технологии также поддерживаются самыми современными СУБД [4]. А еще представляется эффективным использование возможностей, предоставляемых таким программным продуктом, как Microsoft SQL Lite. Данный программный продукт осуществляет поддержку динамической типизации данных, кроме того, он осуществляет прямое обращение к собственным файлам, содержащим необходимую информацию. Библиотека SQL Lite может быть использована на бесплатной основе, а также характеризуется нами в качестве интуитивно понятной для эксплуатации. Она может быть применена, например, в браузерах, а также в прочем софте, обеспечивающем хранение данных SQL Lite вместе с их обработкой. Данная библиотека причисляется к категории встроенных, характеризуется присут-

ствием открытого программного кода. При необходимости воспользоваться техническим сервисом пользователь может это сделать, не внося оплату.

Потребность в том, чтобы обновлять пространственно-временные сведения, присутствующие в АгроГИС, была доказана большим количеством авторов [9]. Обычно в процессе формирования базы геоданных АгроГИС применяются такие СУБД, что являются выстроенными. Данные СУБД осуществляют поддержку моделей, причисляемых к категории нетемпоральных.

А.И. Павлова ранее писала в своей работе: «На локальном уровне в базе геоданных в предложенной модели выделены основные сущности: земельные участки, почвы, тракторы, технологические карты, сельскохозяйственные агрегаты и сельскохозяйственные сотрудники. Они представляют собой реляционные таблицы, включающие темпоральные данные, связанные между собой связями типа один-ко-многим или много-ко-многим множеством картографических объектов и отношений между ними. В пространственной базе данных были созданы пространственные классы объектов, характеризующие климатические, почвенные, геоморфологические особенности, а также использование земель. Земельный участок в базе геоданных локального уровня описывается набором идентификационных, количественных и качественных показателей, связанных с оценкой сельскохозяйственных земель. Это комплекс показателей, отражающий сведения о площади земельного участка, культуре, технологических свойствах, почвах, контрастности почвенного покрова, агротехнологиях» [10, с. 343].

Такая сущность, как «участки земли», охарактеризована совокупностью параметров, причисляемых к категориям атрибутивных, а также геометрических. Данные параметры являются необходимыми с той точки зрения, что они характеризуют, каковы свойства участков, с пространственных, а также технологических позиций [8].

Что же касается таких атрибутов, которые имеют характер темпоральных, то благодаря их использованию можно фиксировать временные характеристики созревания сельскохозяйственной культуры, а также приобретать понимание того, какой степенью урожайности характеризуется та или иная культура. Темпоральные атрибуты позволяют отражать в базе данных сведения о том, выполняется ли сельскохозяйственными работниками предусматриваемый

для них план, в какое время они начинают производить работы, в какое время они завершают работы, в какое время возникали простои в работе. Что касается такой таблицы, куда вносятся данные о технологических операциях, то здесь темпоральные атрибуты также характеризуются присутствием, поскольку с их помощью можно отражать, сколько времени было израсходовано на проведение какой-либо технологической операции.

Заключение

Функциональные возможности по построению динамических моделей, геоинформационному анализу, представлению темпоральных параметров являются ограниченными. В базах геоданных возможно хранение относящихся к информационным объектам непространственных и пространственных данных.

Комплекс пространственных классов, входящих в состав БД АгроГИС, связан с группами земель, климатом, природно-сельскохозяйственным районированием, рельефом, административным делением, гидрографией и геотопами. Расширение содержания базы геоданных обеспечивается на локальном уровне посредством включения сущностей, связанных с сельскохозяйственными сотрудниками, земельными участками, сельскохозяйственными агрегатами, почвами, технологическими картами, тракторами. Выявлено наличие функциональных ограничений по возможности определять агроклиматические характеристики (коэффициенты увлажнения, осадки, испаряемость, температура воздуха) с различным временным разрешением, а также по возможности определять темпоральные атрибуты времени.

БД АгроГИС должна разрабатываться на основе интеграции современных технологических решений веб-приложения, облачных технологий, взаимодействия с веб-приложением СУБД SQLite ГИС.

Список литературы

1. Черных А.И., Оплетев А.С. Анализ повывделенной геобазы с использованием SQL-запросов для определения статистически достоверной информации на примере ГИС MapInfo // Леса России и хозяйство в них. 2013. № 1 (44). С. 53–54.
2. Фомин В.В., Залесов С.В. Географо-генетический подход к оценке и прогнозированию лесных ресурсов с использованием ГИС-технологий // Аграрный вестник Урала. 2013. № 12 (118). С. 18–24.
3. Чернова О.А. Организационно-правовые проблемы обеспечения стратегических национальных приоритетов Российской Федерации в продовольственной сфере // Российская юстиция. 2011. № 12. С. 63–64.

4. Золкин А.Л., Чистяков М.С., Сучков Д.К. Влияние цифрового сегмента реиндустриализации на аграрный сектор национальной экономической системы // *Управленческий учет*. 2021. № 5–2. С. 326–333
5. Матчин В.Т. Базы геоданных // *Образовательные ресурсы и технологии*. 2017. № 3 (20). С. 100–108. DOI: 10.21777/2500-2112-2017-3-100-108.
6. Некрасов В.Н., Дрыгина Ю.А. Сельское хозяйство России: кризисы и необходимость повышения конкурентоспособности // *БИ*. 2012. № 7. С. 77–80.
7. Zolkin A.L., Matvienko E.V., Suchkov D.K., Shamina S.V. Digital Development of Agrarian Production – Institutional Approach // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International science and technology conference “Earth science” (ISTC EarthScience-2022)*. 2022. С. 042070. DOI: 10.1088/1755-1315/988/4/042070.
8. Сучков Д.К. Цифровые технологии в агропромышленном комплексе // *Управленческий учет*. 2021. № 6–3. С. 727–737. DOI: 10.25806/uu6-32021727-737.
9. Дейт К.Дж. Введение в системы баз данных: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. 1328 с.
10. Павлова А.И. Пространственные базы данных агрономических геоинформационных систем // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2021. Т. 13. № 5. С. 336–349.

УДК 911(571.13)

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ
ПРИБРЕЖНОЙ ТЕРРИТОРИИ ОЗЕРА ЭБЕЙТЫ****Филиппова Т.А., Юсова Ю.С.***ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина»,
Омск, e-mail: ta.filippova@omgau.org, yus.yusova@omgau.org*

В работе рассмотрены вопросы организации рекреационной зоны для удовлетворения потребностей населения в кратковременном отдыхе граждан, проживающих на территории Омской области. С учетом видов и форм активного и пассивного отдыха, а также расстояния до рекреационных зон в качестве объекта исследования выбрана территория водоохраной зоны государственного природного комплексного заказника регионального значения «Озеро Эбейты», расположенного в Москаленском муниципальном районе. На основании постановлений правительства Омской области определены основные цели создания заказника, а также перечень мероприятий, направленных на уточнение границ и площади территории, имеющей статус особо охраняемой. Установлены размеры водоохраных зон и прибрежных защитных полос. Анализ и оценка рекреационной значимости территорий позволили провести функциональное зонирование и разработать предложения по обустройству территории в соответствии с требованиями федерального и регионального законодательства. Определен размер арендной платы за проектируемый рекреационный участок. Результаты исследования и проектные предложения подтверждены расчетами экономической эффективности и социального эффекта от реализации проекта. Стоимость проекта составит более 3 млн руб. Проект позволит создать новые рабочие места, что будет способствовать росту налоговых поступлений в бюджет и инвестиционной привлекательности района в целом. Социальный эффект проекта подтверждается рядом социально-значимых улучшений, связанных не только с расширением рекреаций и ростом туристической привлекательности, но и с оздоровлением населения и положительным влиянием на экологию района.

Ключевые слова: рекреационные ресурсы, зонирование территорий для различных видов отдыха, правовой режим природных территорий, социально-экономическая эффективность проектных решений для жителей муниципального района

**PROMISING DIRECTIONS FOR THE DEVELOPMENT
OF THE COASTAL TERRITORY OF LAKE EBEYTY****Filippova T.A., Yusova Yu.S.***Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Omsk,
e-mail: ta.filippova@omgau.org, yus.yusova@omgau.org*

The paper considers the issues of organizing a recreational zone to meet the needs of the population in a short-term rest of citizens living in the Omsk region. Taking into account the types and forms of active and passive recreation, as well as the distance to recreational areas, the territory of the water protection zone of the state natural complex reserve of regional significance "Lake Ebeity" located in the Moskalensky municipal district was chosen as the object of study. On the basis of the resolutions of the government of the Omsk region, the main goals of creating the reserve, as well as a list of measures aimed at clarifying the boundaries and area with the status of a specially protected area, have been determined. The dimensions of water protection zones and coastal protective strips have been established. The analysis and assessment of the recreational significance of the territories made it possible to carry out functional zoning and develop proposals for the development of the territory in accordance with the requirements of federal and regional legislation. The amount of rent for the designed recreational area was determined. The results of the study and project proposals are confirmed by calculations of economic efficiency and social effect of the project. The cost of the project is more than 3 million rubles. The project will create new jobs, contributing to the growth of tax revenues to the budget and the investment attractiveness of the region as a whole. The social effect of the project is confirmed by a number of socially significant improvements associated not only with the expansion of recreation and the growth of tourist attractiveness, but also with the improvement of the population and a positive impact on the ecology of the area.

Keywords: recreational resources, zoning of territories for various types of recreation, legal regime of natural areas, socio-economic efficiency of design solutions for residents of a municipal district

В современных условиях повышается интерес граждан к краткосрочному отдыху и лечению в рекреационных зонах, расположенных в пределах 1–3-часовой доступности от основного места проживания рекреантов. Городское население допускает почти все виды и формы активного и пассивного отдыха, а сельское население предпочитает использовать местные ресурсы, поэтому создание рекреационных

зон в условиях городской или сельской инфраструктуры – одно из перспективных и менее затратных для инвесторов решений. Эти мероприятия позволяют повысить эффективность использования земельных ресурсов муниципальных районов и улучшают инвестиционный климат территории. В связи с этим рекреационный потенциал территории представляет собой один из видов потенциальных возможно-

стей ее использования, а рекреационные потребности населения региона «вливают на формирование рекреационного природопользования» [1].

Цель исследования заключается в выявлении наиболее перспективных направлений развития рекреационных возможностей, способствующих повышению социально-экономического развития муниципальных территорий, их инвестиционной привлекательности на основе анализа и оценки природно-ресурсного потенциала.

Материал и методы исследования

Объектом исследования выбрана особо охраняемая природная (прибрежная) территория «Озеро Эбейты» Москаленского муниципального района Омской области. Исследования осуществлялись с применением следующих методов: монографического (при анализе исходных материалов), абстрактно-логического (при постановке целей и задач исследования), картографического (для обоснования размера и конфигурации участка), расчетно-конструктивного (для обоснования затрат и тарифов на услуги).

В работе использовались материалы законодательного, нормативного и методического характера в области рекреационного природопользования, открытые официальные интернет-ресурсы, характеризующие туристическую и инвестиционную привлекательность региона [2-4].

Результаты исследования и их обсуждение

В отечественной практике существуют различные научные подходы к изучению туристско-рекреационных систем, основным из которых является системный подход. Системный подход предполагает структурно-территориальный анализ потенциала, возможностей и ограничений развития туризма в регионе. В первую очередь такой анализ оценивает туристские дестинации по ряду параметров [5, с. 32].

Определение ценности территории для развития рекреации осуществлялось на основе балльной оценки рекреационного потенциала муниципального района. Оценка проводилась по нескольким блокам параметров: физико-географические условия территории, климатические факторы и рекреационные возможности ландшафтов с учетом освоенности территории и в зависимости от потребностей населения [1]. Посредством использования методики

балльной оценки [6] определены количественно-качественные характеристики степени благоприятности параметров ландшафта для рекреации, выбран объект для дальнейшего исследования. Прикладное значение предложенной методики расчета балльной оценки рекреационных земель заключается в получении данных, которые были использованы при определении перспективных направлений рекреационной деятельности. Наиболее перспективным для данного района является использование земельных участков, расположенных вблизи водных источников.

На территории Москаленского района Омской области озеро Эбейты – самое большое соленое озеро. Общая площадь озера составляет более 10 000 га. Оно расположено на юго-западе Омской области, в 150 км от г. Омска на пересечении границ Москаленского, Полтавского и Исилькульского муниципальных районов. Минерализация солей данного озера выше, чем в знаменитом Мертвом море (в Мертвом море 270–310 г/л, а в оз. Эбейты 300–450 г/л), оно является месторождением лечебных грязей [7, с. 121]. Интересен и природный ландшафт территории, который представлен «марсианскими» пейзажами и солеросами и может быть отнесен к лечебно-оздоровительным ресурсам (лечебно-климатической местности).

Правовой режим и основы функционирования рекреационных зон установлены постановлением правительства Омской области «Об организации государственного природного комплексного заказника регионального значения «Озеро Эбейты». Выбранные в результате исследования направления развития прибрежной территории соответствуют основным целям создания заказника [3, п. 2].

На территории заказника для поддержания и сохранения окружающей природы разрешены следующие действия:

- организация туристических стоянок и размещение палаточных лагерей в специально отведенных для этого местах;
- купание в озере и использование лечебных грязей для целей оздоровления населения;
- добыча биологического сырья в порядке, установленном законодательством Российской Федерации.

В соответствии с действующим законодательством РФ предусмотрено развитие существующих особо охраняемых природ-

ных территорий регионального значения для обеспечения более высокого уровня их охраны и функционирования. Для осуществления таких мероприятий необходимо проводить уточнение границ и площадей на землях, имеющих статус особо охраняемых природных территорий. Важным мероприятием по охране водных ресурсов является отображение границ водоохранных зон и прибрежных полос, на которых устанавливается особый режим хозяйственной деятельности и проводится комплекс природоохранных и санитарно-гигиенических мероприятий [4, ст. 65, п. 2, 6, 15, 16].

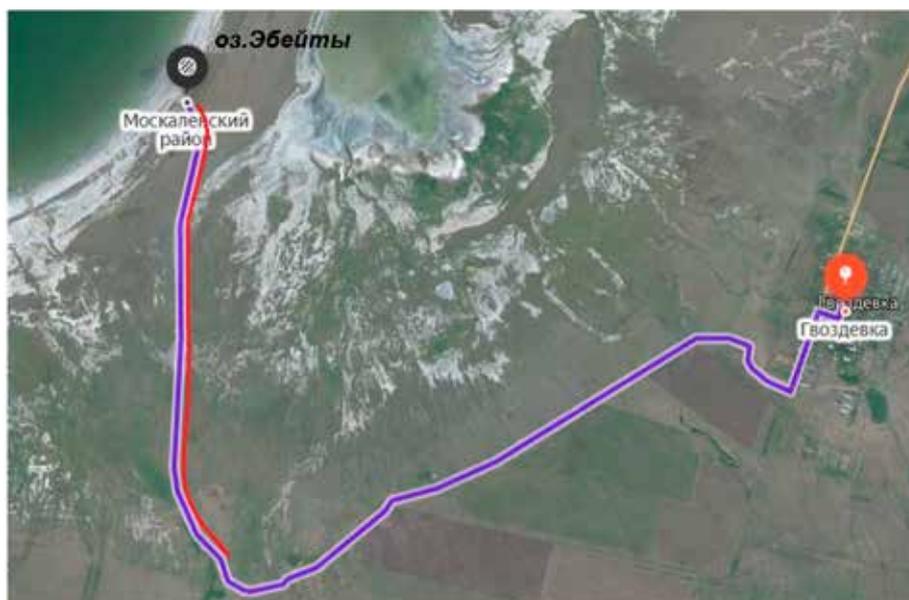
Размеры водоохранных зон и прибрежных защитных полос для озера Эбейты установлены документами территориального планирования [8] и составляют:

- водоохранная зона – 200 м;
- прибрежная защитная полоса – 50 м;
- береговая полоса – 20 м.

На первом этапе разработки проекта по организации рекреационной зоны для кратковременного отдыха и лечения граждан в Москаленском муниципальном районе с помощью картографического метода исследования был определен участок на берегу озера Эбейты площадью 2,0 га. Основанием выбора участка из нескольких возможных вариантов местоположения послужило наличие подъездной дороги к озеру. Размер и конфигурация участка определялись с учетом водоохранной зоны. Данный участок находится на 11 км южнее села Гвоздевка. Добраться до участка можно по грунтовой

непрофилированной дороге, поэтому перед началом работ по осуществлению проекта следует улучшить покрытие части дороги (в 3,5 км), состояние которой ухудшается в период дождей (рисунок). Так как строительство асфальтированной дороги – довольно затратное мероприятие, была предложена альтернатива в виде отсыпки дороги гравием. Он подходит для строительства дорог с интенсивностью движения не более 300 машин в сутки, материал устойчив к влаге и перепадам температур, довольно прочный, поэтому такие дороги могут прослужить до 15 лет.

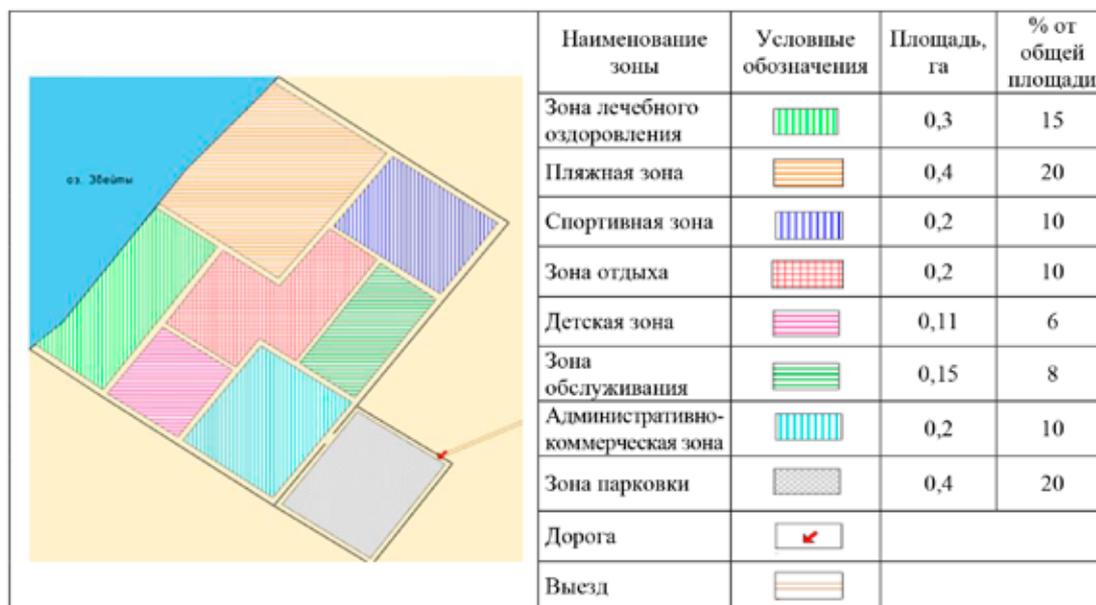
Безусловно, главной составляющей данного рекреационного объекта является лечебная грязь озера Эбейты, которая содержит в себе все основные группы микроорганизмов, определяющих ее высокую бальнеологическую активность, и применяется при лечении различных болезней. Таким образом, обязательными этапами проекта по созданию рекреационного участка являются: расчистка участка и близлежащих территорий от мусора; обеспечение удобного подъезда к рекреационному участку; организация стоянки (парковки) для посетителей на автомобилях; устройство на берегу озера деревянных помостов и спусков для удобного пользования лечебной грязью; оборудование территории малыми архитектурными формами и необходимой инфраструктурой; создание сети пешеходных дорожек для перемещения отдыхающих по территории.



Участок дороги, требующий улучшения дорожного покрытия (красная линия)

Таблица 1

Схема функционального зонирования проектируемого рекреационного участка на оз. Эбейты



В соответствии с описанным выше комплексом мероприятий, территория рекреационного участка условно будет делиться на функциональные зоны, площадные характеристики которых представлены в таблице 1. Зонирование рекреационного участка проведено в соответствии с ГОСТ № 58737-2019 «Места отдыха на водных объектах» [9, п. 9, 10]. В соответствии с конфигурацией и площадью участка была составлена схема функционального зонирования проектируемого рекреационного участка на озере Эбейты (табл. 1).

Зона лечебного оздоровления подразумевает место, где посетители смогут пользоваться лечебной грязью в комфортных условиях, на деревянных помостах, с удобными спусками. Пляжная зона предназначена для массового отдыха, купания и загара, оснащена соответствующим оборудованием (зонты, лежаки). Спортивная зона включает волейбольные площадки для активного отдыха, занятий спортом.

Зона обслуживания запроектирована под устройство кабин для переодевания, душевых кабин и биотуалетов. В связи с тем, что к проектируемому участку не подведены сети водоснабжения, для функционирования объектов инфраструктуры будет задействована специализированная машинная техника (водовозы).

Зона отдыха предназначена для тихого времяпрепровождения под тенью навесами с лавочками, рядом с детской зоной.

Оборудование малыми архитектурными формами (скамьями, урнами, лежаками, зонтами, тенью навесами) позволят сделать территорию более комфортной для отдыха.

Административно-коммерческая зона сформирована под павильон администрации и рабочего персонала. Также в этой зоне возможно в перспективе размещение объектов коммерческой деятельности (павильонов быстрого питания, продажи сувениров).

Для экономического обоснования проектных решений был проведен расчет стоимости запроектированных мероприятий и возможных затрат в региональных ценах 2022 г. (табл. 2). Стоимость проекта в результате проведенных расчетов составила 3,418 тыс. рублей. Оплата доставки материалов и оборудования включена в стоимость работ. Для реализации проекта были определены сроки и этапы работ с учетом сезонности эксплуатации данного объекта. Подготовительный этап: срок реализации – 4 месяца (декабрь, январь, февраль, март) – включает: подготовку проектной документации для участия в конкурсе на соискателя инвестора; получение финансовых средств по результатам подведения конкурса; подготовку технической документации для проведения аукционов на проведение работ по благоустройству; организацию и проведение электронных аукционов на право заключения контрактов на выполнение работ и услуг.

Таблица 2

Стоимость проектных предложений

№ п/п	Наименование работ	Ед. изм.	Объем, кол-во	Цена за ед., тыс. руб.	Стоимость, тыс. руб.
1.	Дорожные работы	м	3500	0,4	1400
2.	Обустройство стоянки (парковки)	кв. м	400	0,3	120
3.	Устройство пешеходных настилов (дорожек)	м	170	0,9	153
4.	Установка малых архитектурных форм, инфраструктуры:				565
	– урны		10	1	10
	– скамьи		10	5	50
	– лежаки		20	3,5	70
	– зонты	Шт.	15	1	15
	– теневые навесы		1	150	150
	– кабины для переодевания		7	13	91
	– душевые		7	17	119
	– биотуалеты		3	20	60
5.	Устройство волейбольной площадки	Шт.	1	180	180
6.	Детская площадка	Шт.	1	150	150
7.	Оборудование временного павильона для администрации	Шт.	1	250	250
8.	Ограждение территории	п. м	400	1,5	600
Итого					3 418

Основной этап: срок реализации – 2 месяца (апрель – май), с проведением дорожных работ, уборки территории, обустройством стоянки (парковки), устройством пешеходных настилов (дорожек), установкой малых архитектурных форм, инфраструктуры, устройством ограждения. Заключительный этап: срок реализации – 1 месяц (июнь) – приемка выполненных работ.

Данный проект, разработанный на основе научных исследований территории района, имеет социально-экономическую направленность и соответствует целям актуальных региональных и муниципальных программ развития. Для реализации проекта необходимо получить следующую разрешительную документацию: разрешение Министерства природных ресурсов и экологии Омской области; разрешение на осуществление градостроительной деятельности (благоустройство территории); разрешение Администрации Москаленского муниципального района. Разрешение на благоустройство оформляется Отделом строительства, газификации, архитектуры и ЖКК Администрации Москаленского муниципального района.

Озеро Эбейты как водный объект находится в собственности Российской Федерации, поэтому для организации зоны отдыха необходимо оформить договор аренды на данный участок. Данный вопрос решается по согласованию с региональным

управлением Федерального агентства водных ресурсов. Право аренды участка выставляется на аукцион, либо заключается договор аренды с администрацией муниципального района. Минимальная арендная плата строго регламентируется законом [10, п. 2,3]. Арендная плата для выбранного участка рассчитывалась на основании его кадастровой стоимости. В Москаленском муниципальном районе средний удельный показатель кадастровой стоимости за земли сельскохозяйственного назначения равен 3,19 рубля за 1 кв. м. Кадастровая стоимость участка площадью 2 га составит 63 800 рублей. В соответствии с постановлением Правительства РФ, при ставке в 2% от кадастровой стоимости арендная плата за проектируемый рекреационный участок составит 1 276 рублей в год. Учитывая, что земли вокруг озера засолены и не используются в сельскохозяйственном производстве, организация на этой территории иного вида деятельности повысит эффективность использования земельных ресурсов района.

Оценка социально-экономической эффективности проектных предложений предполагает комплексный учет экономических и социальных последствий в результате реализации инвестиционного проекта. Это обстоятельство особенно важно, когда речь идет о социально значимых проектах, касающихся развития всего муниципального образования.

Таблица 3

Расчет примерного срока окупаемости проекта

Наименование статьи	2022	2023	2024	2025
Выручка	2 400 000	2 640 000	2 904 000	3 194 400
Операционные расходы, в том числе:	526 576	589 106	677 281	778 681
Расходы на персонал	300 000	330 000	379 500	436 425
содержание объектов инфраструктуры	0	10 000	11 500	13 225
обеспечение водой	108 000	118 800	136 620	157 113
арендная плата за земельный участок	1 276	1 276	1 276	1 276
вывоз мусора	24 000	26 400	30 360	34 914
Налоги и сборы	93 300	102 630	118 025	135 728
Денежный поток по операционной деятельности	1 873 424	2 050 894	2 226 720	2 415 719
Денежный поток по инвестиционной деятельности	-3 418 000	0	0	0
Чистый денежный поток	-1 544 576	-1 367 106	859 614	3 275 332

Однако для привлечения средств инвесторов к осуществлению проекта необходимо обосновать экономическую целесообразность проекта, поэтому предлагается оценить срок окупаемости рассматриваемого проекта.

В настоящее время существует как безвозмездное, так и платное пользование рекреационными ресурсами [11, с. 393]. В условиях рыночной экономики предполагается, что после реализации проекта будет введена плата за пользование зоной рекреации в размере 500 рублей за вход для взрослых и 200 рублей для детей и студентов, при этом с детей до 7 лет, пенсионеров плата не взимается. При расчете, что рекреационный участок будут посещать минимум 40 человек в день, не имеющих льготы, ежемесячно плата за вход составит 600 тыс. рублей, в год (только в летний сезон 4 месяца) – 2 400 тыс. рублей. При расчете срока окупаемости следует учитывать единовременные и ежемесячные затраты, а также поступающую прибыль. На территории рекреационного участка будут действовать рабочий персонал, два администратора и охранник. В среднем ежемесячная зарплата каждому будет составлять 25 000 рублей, в год – 300 тыс. рублей (с учетом среднего уровня зарплат в районе).

К затратам также относится вывоз мусора, по предполагаемым расчетам необходимый 2 раза в месяц, затраты на который в период действия рекреационной зоны составят 24 тыс. рублей. Доставка воды автоцистернами объемом 7500 л потребуется

6 раз в месяц (приблизительно 30 л на одного человека). Таким образом, в год стоимость данной услуги составит 108 тыс. рублей. Примерный расчет затрат определялся исходя из действующего среднего ценового сегмента (из открытых интернет-источников). Для определения сроков окупаемости проведен расчет чистого дохода (табл. 3).

Исходя из результатов таблицы 3, окупаемость рассматриваемого проекта наступит на третий год реализации с доходом в 859 тыс. рублей, рентабельность создания рекреации по вложенным инвестициям является приемлемой для проекта подобного типа, и его можно считать экономически целесообразным.

Заключение

Проведенное исследование показало, что туристско-рекреационные ресурсы определяются как «совокупность природных и антропогенных объектов и явлений окружающей среды» [5, с. 140], в различной степени пригодных для производства и обеспечения туристско-рекреационных услуг. Применяемый метод балльной оценки рекреационных ресурсов территории позволяет с высокой степенью достоверности выявить объекты, которые в условиях дистанционного доступа повысят инвестиционную привлекательность региона.

В современных условиях развитие локальных рекреационных проектов, требующих относительно незначительных капиталовложений, кроме экономического эффекта также обладают и социальной зна-

чимостью. Социальные эффекты предлагаемого проекта будут проявляться в значительном пополнении инфраструктуры рекреационной среды района, появлении объекта, привлекательного для жителей не только района, но и для всего региона, создании условий для организованного комфортного отдыха и оздоровления населения на озере Эбейты, в росте инвестиционной привлекательности района, создании новых рабочих мест непосредственно для рекреационного участка.

Реализация подобных проектов по созданию рекреационных участков будет оказывать положительное экологическое влияние на прилегающие территории, так как организуемая рекреационная деятельность будет упорядочена и регламентирована.

Список литературы

1. Комарова С.Ю., Шелехина Я.Е. Рекреационный потенциал и перспективы развития рекреационной деятельности в Омской области // Актуальные проблемы и перспективы развития геодезии, землеустройства и кадастра недвижимости в условиях рыночной экономики: материалы национальной научно-практической конференции. (Омск, 24 ноября 2016 года). Омск: ИП Макшеевой Е.А., 2017. С. 66-71.
2. Исламова Ф.С. Факторы и условия развития структуры туристско-рекреационного потенциала территории // Научное обозрение. Экономические науки. 2016. № 6. С. 75-79.
3. Об организации государственного природного комплексного заказника регионального значения «Озеро Эбейты»: Постановление правительства Омской области от 17.05.2012 №110-п. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/943049134/> (дата обращения: 04.09.22).
4. Водный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон от 3 июня 2006 года N 74-ФЗ (ВК РФ) (Принят Государственной Думой 12 апреля 2006 года: Одобрен Советом Федерации 26 мая 2006 года). [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683/ (дата обращения: 04.09.2022).
5. Вишняков Н.В. Методика оценки туристско-рекреационного потенциала дестинаций в современных условиях: дис. ... канд. экон. наук. Санкт-Петербург, 2022. 166 с.
6. Комарова С.Ю., Щерба В.Н., Долмагова О.Н. Основы организации рекреационного природопользования Омской области // Московский экономический журнал. 2021. № 7. DOI: 10.24411/2413-046X-2021-10397.
7. Аубакирова А.Б., Филиппова Т.А. Оценка рекреационной ценности водных ресурсов Москаленского района Омской области // Устойчивое развитие земельно-имущественного комплекса муниципального образования: землеустроительное, кадастровое и геодезическое сопровождение: сборник научных трудов по материалам II национальной научно-практической конференции. (Омск, 11 ноября 2021 года). Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2021. С. 120-124.
8. Генеральный план Новоцарицынского сельского поселения Москаленского муниципального района Омской области / ООО «Национальный земельный фонд». Омск, 2020. 158 с.
9. ГОСТ Р 58737-2019 Места отдыха на водных объектах. Общие положения: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 декабря 2019 г. № 1363-ст: дата введения 2019-10-12 / разработан Обществом с ограниченной ответственностью «Техречсервис» (ООО «Техречсервис»). М.: Стандартинформ, 2020. 16 с.
10. Об основных принципах определения арендной платы при аренде земельных участков, находящихся в государственной или муниципальной собственности, и о Правилах определения размера арендной платы, а также порядка, условий и сроков внесения арендной платы за земли, находящиеся в собственности Российской Федерации: Постановление правительства Омской области Правительства РФ от 16.07.2009 № 582 (ред. от 29.12.2021). [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_89826/ (дата обращения 03.09.2022).
11. Шелехина Я.Е., Рогатнев Ю.М. Функционирование существующих рекреационных объектов Омской области в условиях рыночной экономики // Геодезия, землеустройство и кадастры: проблемы и перспективы развития, посвященная 100-летию советской геодезии и картографии: сборник материалов I Международной научно-практической конференции (Омск, 15 марта 2019 года). Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2019. С. 391-395.

УДК 502.2.08

ОСОБЕННОСТИ ГРУППОВОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ОРГАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ТОРФА АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

Чибисова В.Г.

ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаврова» УрО РАН, Архангельск, e-mail: leratatarintseva@gmail.com

Архангельская область относится к одним из наиболее богатых торфяными ресурсами регионов Северо-Запада РФ. Кроме того, регион частично входит в Арктическую зону России, которая на государственном уровне напрямую связана с планами интенсивного освоения Северных территорий страны. Вместе с тем торф – уникальный возобновляемый природный ресурс, который может быть использован во многих отраслях народного хозяйства. Цель работы заключается в анализе особенностей группового химического состава органической части торфа, сформированного в различных районах Архангельской области (в пределах Арктической зоны РФ) под действием различных природных условий. В качестве объектов исследования были выбраны 3 болота на территории Архангельской области: Иласское болото в Приморском районе, болото Большой Мох в Онежском районе и Трофимовское болото в Мезенском районе. Из торфа были выделены и количественно определены такие группы веществ, как водорастворимые вещества, битумы, гуминовые и фульвовые кислоты, легко- и трудногидролизуемые вещества, а также лигнин. Проведенные исследования показали, что торф, сформированный в различных районах Архангельской области, различается по содержанию практически всех групп веществ, что проявляется как по глубине залегания торфа на конкретном болоте, так и в зависимости от условий формирования, что свидетельствует о влиянии природных условий на химический состав торфа. При этом наибольшие отличия характерны для болота Большой Мох в Онежском районе области. Достоверность различий подтверждена статистически с помощью непараметрического критерия Краскела-Уоллиса.

Ключевые слова: торф, групповой химический состав, рациональное природопользование, Архангельская область, Арктическая зона РФ

FEATURES OF THE GROUP CHEMICAL COMPOSITION OF THE ORGANIC PART OF PEAT IN THE ARKHANGELSK REGION

Chibisova V.G.

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Science, Arkhangelsk, e-mail: leratatarintseva@gmail.com

The Arkhangelsk region is one of the North-West of the Russian Federation regions with the richest peat resources. In addition, the region is partly included in the Arctic zone of Russia, which at the state level is directly connected with plans for the intensive development of the country's northern territories. At the same time, peat is a unique renewable natural resource that can be used in many sectors of the national economy. The purpose of the work is to analyze the features of the group chemical composition of the organic part of peat formed in various regions of the Arkhangelsk region (within the Arctic zone of the Russian Federation) under the influence of various natural conditions. Three bogs on the territory of the Arkhangelsk region were chosen as objects of study – the Ilasskoe in the Primorsky district, the Bolshoy Mokh in the Onega district and the Trofimovskoe in the Mezensky district. Water-soluble substances, bitumen, humic and fulvic acids, easily and hardly hydrolysable substances, and lignin were isolated and quantified from peat. The studies have shown that peat formed in different areas of the Arkhangelsk region differs in the content of almost all groups of substances, which manifests itself both in the depth of peat occurrence in a particular bog and depending on the conditions of formation, which indicates the influence of natural conditions on the peat chemical composition. At the same time, the greatest differences are typical for the Bolshoi Mokh bog in the Onega district. The significance of differences was statistically confirmed using the nonparametric Kruskal-Wallis test.

Keywords: peat, group chemical composition, Arkhangelsk region, rational nature management, Arctic zone of Russia

На территории России находится свыше 40% мировых запасов торфа, а Архангельская область относится к одним из наиболее богатых торфяными ресурсами регионов Северо-Запада РФ [1]. Кроме того, территория Архангельской области частично входит в Арктическую зону России [2], которая на государственном уровне напрямую связана с планами интенсивного освоения Северных территорий страны. Вместе с тем торф – уникальный возобновляемый природный ресурс, который может быть использован не только в таких широ-

ко распространенных направлениях, как сельское хозяйство и энергетика, но и как источник ценных биологически активных соединений [3].

Известно, что процесс торфообразования зависит от комплекса природных факторов: климата, строения земной коры, почвенных условий, рельефа и характера растительности. При этом разные природные условия приводят к образованию торфа с различными свойствами, которые могут быть целенаправленно использованы в определенных отраслях народного хозяй-

ства [4]. Таким образом, изучение химического состава торфа Архангельской области позволит оценить особенности торфяного сырья региона и предложить возможные варианты переработки торфа с учетом требований рационального природопользования.

Цель исследования: анализ особенностей группового химического состава органической части торфа, сформированного в различных районах Архангельской области (в пределах Арктической зоны РФ).

Материал и методы исследования

В качестве объектов исследования были выбраны три торфяных болота, расположенные в различных районах Архангельской области в пределах Арктической зоны РФ: Иласское болото в Приморском районе, болото Большой Мох в Онежском районе и Трофимовское болото в Мезенском районе (рисунок). Выбор объектов исследования обусловлен различиями в климатических характеристиках (средние годовые температуры, количество осадков, преобладающие направления ветров), геологических условиях (наличие водонепроницаемых пород), особенностях рельефа и характере расти-

тельности. Например, анализ климатических характеристик показал, что на исследуемых территориях с востока на запад происходит снижение среднемноголетних температур и увеличение количества выпадающих осадков. Также в исследуемых районах отличаются направления ветров и их скорость. Подробные описания объектов исследования и их характеристик приведены в [5].

Отбор проб торфа проводили в летние полевые сезоны 2019-2022 гг. методом послойного бурения торфяным буром Р 04.09 (EIJKELKAMP, Нидерланды). Подготовка торфа к дальнейшим анализам включала в себя сушку до воздушно-сухого состояния, а затем фракционирование на сите с диаметром ячеек 2 мм. Для отбора проб выбирали типичные для каждого болота элементы микрорельефа, расположенные ближе к центру болотной фации. На каждом болоте в соответствии с [6] было отобрано по 3 колонки торфа, каждую из которых визуально разделяли на однородные слои (торф одинакового цвета, структуры и консистенции составляет один слой). Анализ проводили для каждого слоя отдельно, полученные данные усредняли математически.



Объекты исследования в пределах Архангельской области:

- 1 – болото Большой Мох (Онежский район);
- 2 – Иласское болото (Приморский район);
- 3 – Трофимовское болото (Мезенский район)

Определение группового химического состава проводили по аттестованной методике [7], основанной на последовательном выделении из торфа отдельных групп веществ экстракцией различными растворителями и их количественном определении гравиметрическим методом. Подробное описание методики приведено в работе [8]. Определение влажности и зольности торфа проводили по стандартным методикам. Влажность – путем высушивания навески торфа в сушильном шкафу при температуре 105 ± 5 °С до постоянной массы, а зольность – при прокаливании навески торфа в муфельной печи при температуре 800 °С. Статистическую обработку полученных результатов проводили средствами Microsoft Excel и Statistica 13.5. Для подтверждения достоверности различий в групповом химическом составе торфа трех болот рассчитывали критерий Краскела-Уоллеса – непараметрический тест, который является аналогом однофакторного дисперсионного анализа для независимых выборок и служит для определения достоверности различий между несколькими выборками. Различия считаются достоверными, если значение уровня значимости критерия не превышает принятого порога 0,05 [9].

Результаты исследования и их обсуждение

Исследуемые торфяные болота относятся к верховому типу. На территории Иласского и Трофимовского болот верховой торф располагается по всей глубине залежи и имеет достаточно однородный ботанический состав, сложенный в основ-

ном из сфагновых мхов с различными примесями. В Онежском районе верхние слои залежи сложены верховым сфагновым торфом с низкой степенью разложения, а нижние – переходным торфом с заметным присутствием осоковых и древесных остатков. При этом наблюдаются характерные для переходного торфа черты: увеличение степени разложения (до 50%), зольности (более 20%) и значений pH [5].

Торф каждого из трех болот имеет примерно одинаковую естественную влажность, которая несколько снижается с глубиной. В верхних горизонтах влажность изменяется в пределах 90-93%, а в нижних – 85-89%. Средние значения зольности в верхней части залежи для всех площадок примерно равны 1%. Для Трофимовского болота зольность торфа практически не меняется и составляет 1,1-1,2% по всей глубине залежи. На Иласском болоте, по сравнению с верхним слоем залежи (0,9%), содержание золы увеличивается примерно в 2 раза на глубине около 3 м (1,8%). В торфе, отобранном на болоте Большой Мох, происходит значительное увеличение зольности по всему торфяному профилю от 1,1% в верхнем слое до 21,9% на глубине 3 м.

Из торфа были выделены и количественно определены такие группы веществ, как водорастворимые (ВРВ) вещества, битумы (Б), гуминовые (ГК) и фульвовые кислоты (ФК), легко- и трудногидролизуемые вещества (ЛГВ и ТГВ), а также лигнин (Л) – негидролизуемый остаток. Средние (арифметические) значения содержания этих групп веществ в% на абсолютно сухую массу торфа со среднеквадратичным отклонением приведены в таблице 1.

Таблица 1

Групповой химический состав органической части торфа

Глубина, см	ВРВ, %	Б, %	ГК, %	ФК, %	ЛГВ, %	ТГВ, %	Л, %
Болото Большой Мох (Онежский район)							
0-110	1,2 ± 0,1	2,3 ± 0,4	11,4 ± 0,2	6,3 ± 0,5	50,3 ± 1,3	11,8 ± 0,8	17,9 ± 0,7
110-180	1,1 ± 0,1	7,9 ± 1,8	30,0 ± 2,1	3,3 ± 0,3	19,6 ± 1,8	3,9 ± 0,1	35,3 ± 1,6
180-300	1,1 ± 0,1	3,3 ± 1,2	27,7 ± 2,2	3,5 ± 0,3	23,8 ± 3,3	3,7 ± 0,6	38,0 ± 3,3
Трофимовское болото (Мезенский район)							
0-100	1,4 ± 0,1	2,5 ± 0,2	14,5 ± 1,0	5,5 ± 0,3	48,4 ± 1,1	10,5 ± 1,8	18,6 ± 1,3
100-150	2,0 ± 0,3	4,4 ± 0,5	24,6 ± 1,0	3,3 ± 0,8	37,1 ± 1,1	8,5 ± 0,7	22,1 ± 0,5
Иласское болото (Приморский район)							
0-270	1,9 ± 0,3	4,5 ± 0,8	13,2 ± 1,8	5,7 ± 0,7	45,5 ± 3,3	12,8 ± 0,3	18,2 ± 0,6
270-350	0,9 ± 0,2	6,1 ± 0,2	22,4 ± 0,9	6,2 ± 0,3	27,0 ± 2,6	8,6 ± 1,2	29,8 ± 1,3

Таблица 2

Значения критерия Краскела-Уоллеса

Группа веществ	Значение критерия при уровне значимости 0,05
Верхние горизонты (0-110, 0-100, 0-260 см)	
Битумы	0,0033
Гуминовые кислоты	0,0338
Легкогидролизуемые вещества	0,1034
Лигнин	0,6449
Нижние горизонты (180-300, 100-150, 260-350 см)	
Битумы	0,0023
Гуминовые кислоты	0,0013
Легкогидролизуемые вещества	0,0015
Лигнин	0,0005

ВРВ (в нашем случае это вещества, растворимые в горячей воде) состоят в основном из низкомолекулярных соединений фенольной природы и полисахаридов. Доля этих соединений в торфе, особенно верховом, как правило, невелика. Количество ВРВ в торфе незначительно отличается для трех болот и в среднем варьируется в пределах от 0,9 до 2%. Содержание этой группы веществ не меняется по глубине залежи на болоте Большой Мох, снижается на Иласском болоте, а на Трофимовском болоте – возрастает.

Значительные различия отмечаются в содержании битумной (липидной) части торфа. Битумы представляют собой вещества, извлекаемые органическими растворителями (спиртом, эфиром, бензином, ацетоном и пр.). С химической точки зрения в состав битумов входят сложные эфиры (жиры и растительные масла), смеси высокомолекулярных одноатомных спиртов (воски) и высокомолекулярных кислот и эфиров этих спиртов. Содержание битумов варьируется в пределах от 2,3 до 7,9% в торфе Онежского района, от 2,5 до 4,4% в торфе Мезенского района и от 4,5 до 6,1% в торфе Приморского района. Причем для Иласского и Трофимовского болот с увеличением глубины залегания увеличивается содержания битумов. В торфе болота Большой Мох содержания битумов достигает максимума (7,9%) в горизонте 110-180 см, а затем вновь снижается.

Гуминовые вещества – специфические соединения, которые образуются в процессе торфообразования. Они обладают способностью растворяться в щелочи и осаждаются кислотами. Обычно увеличение в торфе гуминовых веществ сопровождается сниже-

нием ЛГВ и ТГВ. Поскольку формирование торфа – это длительный процесс с постоянно изменяющимися условиями окружающей среды, содержание ГК и ФК значительно изменяется с глубиной залегания торфа. Наибольшее количество ГК отмечается в торфе Онежского района – 30%. По глубине залегания торфа содержание этой группы веществ находится в пределах 11,4-30,0% для болота Большой Мох, 14,5-24,6% для Трофимовского болота и 13,2-22,4% для Иласского болота. ФК, в отличие от ГК, неравномерно распределены по глубине торфяной залежи трех болот. Снижение содержания ФК с глубиной происходит в торфе Онежского и Мезенского районов, а в торфе Приморского района – наоборот. По показателю глубины гумификации ($C_{ГК}:C_{ФК}$) все исследуемые торфы, кроме самого верхнего горизонта торфа Онежского района, относятся к гуматному типу – $C_{ГК}:C_{ФК} > 2$. Горизонт торфа 0-110 см болота Большой Мох относится к фульватно-гуматному типу – $C_{ГК}:C_{ФК} = 1,8$ [10].

К легкогидролизуемым соединениям относятся вещества, растворимые в воде только после гидролиза слабыми кислотами: пентозы, гексозы, уроновые кислоты, азотсодержащие вещества белковой природы. К трудногидролизуемым веществам относят целлюлозу, которая подвергается гидролизу под действием концентрированных кислот. Доля ЛГВ и ТГВ в целом снижается в торфе каждого болота с увеличением глубины залегания, что свидетельствует о протекании гумификации растительных остатков и образовании гуминовых веществ за счет распада биодоступных соединений. Количество ЛГВ в торфе Онеж-

ского района варьируется от 19,6 до 50,3%, от 37,1 до 48,4% – в торфе Мезенского района и от 27,0 до 45,5% – в торфе Приморского района. Закономерно, снижение доли ЛГВ и ТГВ в торфе с глубиной приводит к увеличению негидролизующего остатка (лигнина). Причем в данном случае отличий по содержанию лигнина в торфе трех болот не отмечается.

Таким образом, при сравнении средних значений содержания групп веществ было выявлено, что химический состав органической части торфа исследуемых болот различается (в том числе и с глубиной залегания торфа) по содержанию практически всех компонентов. Для подтверждения достоверности этих различий был применен непараметрический критерий Краскела-Уоллеса (табл. 2).

Результаты расчета показали, что значение критерия не превышает уровня значимости 0,05 для гуминовых кислот и битумов верхних горизонтов торфа, а для нижних горизонтов – для всех проанализированных групп веществ (битумы, гуминовые кислоты, легкогидролизующие вещества, лигнин). Это свидетельствует о существовании статистически значимых отличий в содержании этих компонентов [9].

Таким образом, проведенные исследования показали, что торф, сформированный в различных районах Архангельской области, различается по химическому составу органической части. При этом в ранее проведенных исследованиях было отмечено, что верховой торф Приморского и Мезенского районов отличается однородностью ботанического состава и низкой степенью разложения, в то время как торф Онежского района представлен как верховым сфагновым торфом, обладающим такими же свойствами, так и переходным торфом средней и высокой степени разложения [5]. В данной работе были выявлены также отличия в содержании таких важных компонентов, как битумы и гуминовые кислоты – наибольшее количество этих групп веществ выявлено в торфе Онежского района.

Вместе с тем известно, что верховой сфагновый торф обладает высокой степенью пористости, влагоудерживающей и поглощательной способностью. Это позволяет рассматривать его как перспективный ресурс для получения сорбентов различного назначения [11-13]. Помимо сорбентов, специфические свойства торфа востребованы при культивировании овощных и цветочных культур, при этом полезны

не только его поглощательные способности, но и антисептические свойства [14]. Переходный торф наиболее выгодно применять в сельском хозяйстве, так как он обладает меньшей кислотностью, содержит большее количество питательных элементов и, соответственно, требует меньших затрат на его улучшение (известкование, насыщение минеральными компонентами). Повышенное содержание битумов и гуминовых кислот делает переходный торф более выгодным ресурсом для целенаправленного выделения этих компонентов.

Заключение

В работе проанализирован групповой химический состав органической части торфа болот, сформированных в различных районах Архангельской области. Из торфа были выделены и количественно определены такие компоненты, как водорастворимые вещества, битумы, гуминовые и фульвовые кислоты, легко- и трудногидролизующие вещества, лигнин. Статистическая обработка полученных результатов показала, что существуют достоверные отличия в содержании практически всех групп веществ, что свидетельствует о влиянии природных условий на свойства торфа. При этом наибольшие отличия характерны для болота Большой Мох в Онежском районе области.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90037 «Влияние геоэкологических факторов на свойства торфяных отложений Архангельской области (в пределах Арктической зоны)».

Список литературы

1. Михайлов А.В., Иванов С.Л., Большунов А.В., Кремеев Э.А. Торфяные ресурсы Северо-Западного федерального округа России и перспективы их освоения // Записки горного института. 2013. Т. 200. С. 226-230.
2. Указ президента Российской Федерации от 02.04.2014 г. № 296 «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации». [Электронный ресурс]. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=102349446> (дата обращения: 03.11.2022).
3. Селянина С.Б., Татаринцева В.Г., Серебренникова О.В., Зубов И.Н., Орлов А.С. Влияние растворителя на выход и состав торфяных битумов // Успехи современного естествознания. 2019. № 5. С. 83-88.
4. Цыганов А.Р., Томсон А.Э., Соколова Т.В., Пехтерева В.С., Орлов А.С., Селянина С.Б., Труфанова М.В., Пономарева Т.И., Ярыгина О.Н., Зубов И.Н. Геоклиматические условия как фактор влияния на формирование органической части верхового торфа // Природопользование и экологические риски: материалы научно-практической конференции (г. Минск, 5 июня 2019 г.). Минск: БГТУ, 2019. С. 279-284.
5. Татаринцева В.Г., Котова Е.И., Орлов А.С., Пономарева Т.И., Селянина С.Б., Дайбова Е.Б. Металлы и As в торфе верховых болот Архангельской области // Успехи современного естествознания. 2022. № 6. С. 60-65.

6. Инструкция по разведке торфяных месторождений СССР / под. ред. Н.Т. Короля, В.Д. Макарова, А.В. Предтеченского, А.А. Синадского, Н.А. Стеклова. Министерство геологии СССР. Москва, 1983. 96 с.
7. Методика измерений группового химического состава торфа гравиметрическим методом № 88-16365-009-2017. Свидетельство об аттестации выдано 06.12.2017. Номер государственной регистрации «ФР.1.31.2018.29621» / С.Б. Селянина, Т.И. Пономарева, А.С. Орлов, О.Н. Ярыгина, М.В. Труфанова. 20 с.
8. Ярыгина О.Н., Пономарева Т.И., Труфанова М.В., Селянина С.Б., Парфенова Л.Н., Хвиюзов С.С., Томсон А.Э., Соколова Т.В., Стригуцкий В.П., Пехтерева В.С. К вопросу о содержании групповых составляющих торфа в зависимости от применяемых схем их выделения // Природопользование. 2015. Вып. 28. С. 90-95.
9. Бондаренко А.С., Жигунов А.В. Статистическая обработка материалов лесоводственных исследований: учебное пособие. СПб: Из-во Политехнического университета, 2016. 125 с.
10. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И. Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 256 с.
11. Бобошин А.Н. Сорбент торфяной и способ его получения // Патент РФ № 2560366. Патентообладатель ОАО «Соколагрохимия». 2015. 7 с.
12. Томсон А.Э., Соколова Т.В., Навоша Ю.Ю., Сосновская Н.Е., Пехтерева В.С., Зюзин Б.Ф. Сорбенты на основе торфа как компонент подстилки при напольном содержании цыплят-бройлеров // Труды Инсторфа. 2019. № 19 (72). С. 45-48.
13. Томсон А.Э., Соколова Т.В., Сосновская Н.Е., Навоша Ю.Ю., Царюк Т.Я., Пехтерева В.С., Фалюшина И.П., Царенок А.А. Энтеросорбционная ферроцинсодержащая кормовая добавка на основе торфа // Природопользование. 2020. № 2. С. 125-131.
14. Красинская Т.А., Кухарчик Н.В. Основные характеристики субстратов, применяемых в сельском хозяйстве // Плодоводство. 2011. Т. 23. С. 402-419.

УДК 504.055

ПРИРОСТ БИОМАССЫ *CHLORELLA VULGARIS* ПРИ ЭКСПОЗИЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ КРАЙНЕВЫСОКИХ ЧАСТОТ

Щеглов Г.А., Маслобоев В.А.

¹Институт проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты,
e-mail: g.scheglov@ksc.ru

Электромагнитное излучение (ЭМИ) крайневысоких частот (КВЧ) демонстрирует способность к угнетению и стимулированию живых организмов. Действие ЭМИ КВЧ на микроорганизмы изучается научным сообществом. Воздействие ЭМИ КВЧ на микроводоросль *Chlorella vulgaris* изучено слабо. *Chlorella vulgaris* применяется в различных сферах. Очистка карьерных сточных вод от загрязнения соединениями неорганического азота – проблема горнодобывающего производства, в решении которой может помочь *Chlorella vulgaris*. Поэтому разработать метод увеличения прироста микроводоросли *Chlorella vulgaris* – актуальная задача. В статье описаны результаты исследования воздействия электромагнитного излучения (ЭМИ) крайневысоких частот (КВЧ) в диапазоне 38–53 ГГц при экспозиции 8 часов на рост биомассы и формы хлорофилла и каротиноидов одноклеточной микроводоросли *Chlorella vulgaris* в водной суспензии. Прирост биомассы микроводоросли и изменение концентрации фотосинтетических пигментов при воздействии электромагнитным излучением крайневысоких частот увеличивались и уменьшались на различных частотах. Отмечено увеличение прироста биомассы в 2,37 раза при облучении ЭМИ КВЧ с частотой 40 ГГц. Проведено сравнение полученных результатов с работами других авторов. Оценены перспективы дальнейших исследований и практического применения полученных знаний для разработки методик наращивания биомассы микроводорослей, и применения *Chlorella vulgaris* для очистки сточных вод от загрязнений соединениями неорганического азота.

Ключевые слова: ЭМИ, КВЧ, миллиметровый диапазон, биологический эффект, микроводоросль, биомасса, хлорофилл, каротиноиды

CHLORELLA VULGARIS BIOMASS GROWTH DURING EXTREMELY HIGH FREQUENCY ELECTROMAGNETIC RADIATION EXPOSURE

Shcheglov G.A., Masloboev V.A.

*Institute of Industrial Ecology Problems in the North, Kola Science Center,
Russian Academy of Science (INEP KSC RAS), Apatity, e-mail: g.scheglov@ksc.ru*

Extremely high frequencies (EHF) electromagnetic radiation (EMR) demonstrates the ability to inhibit and stimulate living organisms. The EHF EMR effect on microorganisms is being studied by the scientific community. At the same time, the EHF EMR effect on the microalgae *Chlorella vulgaris* has been poorly studied. *Chlorella vulgaris* is used in various fields. The treatment of quarry wastewater from contamination with inorganic nitrogen compounds is a mining problem, which *Chlorella vulgaris* can help solve. Therefore, it is an urgent task to develop a method to increase the growth of *Chlorella vulgaris*. The article describes the results of a study of the effects of electromagnetic radiation (EMR) of extremely high frequencies (EHF) in the range of 38-53 GHz at an exposure of 8 hours on the growth of biomass and the form of chlorophyll and carotenoids of the unicellular microalgae *Chlorella vulgaris* in aqueous suspension. The growth of microalgae biomass and the change in the concentration of photosynthetic pigments when exposed to electromagnetic radiation of extremely high frequencies increased and decreased at various frequencies. An increase in biomass growth by 2.37 times was noted when irradiated with EHF EMR at a frequency of 40 GHz. The results obtained were compared with the works of other authors. The prospects of further research and practical application of the acquired knowledge for the development of methods for increasing the biomass of microalgae, and the use of *Chlorella vulgaris* for wastewater treatment from contamination with inorganic nitrogen compounds are evaluated.

Keywords: EMR, EHF, millimeter range, biological effect, microalgae, biomass, chlorophyll, carotenoids

Накоплен большой объем работ, рассматривающих действие электромагнитных излучений (ЭМИ) крайневысоких частот (КВЧ) на живые организмы. Существенный вклад внесли академик Н.Д. Девятков и профессор О.В. Бецкий, обнаружившие терапевтическое действие ЭМИ КВЧ при лечении человека [1, 2]. Позднее начали появляться работы по изучению действия ЭМИ КВЧ на микроорганизмы. Цель подобных работ – применение полученных знаний для создания и совершенствования биотехнологий. Причем полезным может

оказаться как стимулирующее действие ЭМИ КВЧ [3, 4, 5], так и угнетающее [6].

Объект в исследовании действия ЭМИ миллиметрового диапазона – хлорелла. Хлорелла (*Chlorella Beij.*, 1890) – обширно распространенная в природе одноклеточная фотосинтезирующая планктонная микроводоросль. *Chlorella* применяется как пищевая добавка; корм; для синтеза кислорода и создания биотоплива; для восстановления водоемов и очистки сточных вод; в качестве тест-объекта при экологическом мониторинге. Показана способность очи-

щать воду от соединений неорганического азота в различных температурных режимах с эффективностью 85–100% [7, 8] – востребованная задача горнодобывающего производства.

Применение в биотехнологиях открывает возможность применения *Chlorella* в качестве объекта для разработки методик стимулирования роста микроводорослей, а простота организации и культивирования дает возможность оценить действия различных факторов, в том числе воздействия ЭМИ, на *Chlorella*. В работе [9] исследовалось воздействие низкоинтенсивного низкочастотного электромагнитного поля (ЭМП) с мощностью 3 мВт на *Chlorella vulgaris*. Было установлено, что низкоинтенсивное низкочастотное ЭМП способно усиливать кластеризацию клеток. Успехов по стимулированию *Chlorella vulgaris* добился Н.А. Суховский [10]. Разработанный реактор, использующий электростатическое поле для стимуляции роста *Chlorella vulgaris*, увеличивает эффективность выращивания водоросли в 2 раза.

Цель исследования: выявить, как ЭМИ в диапазоне частот 38–53 ГГц воздействует на микроводоросль *Chlorella vulgaris*, и оценить, можно ли использовать ЭМИ КВЧ для стимулирования роста микроводоросли. Этот вопрос для *Chlorella vulgaris* будет рассмотрен впервые.

Как показано в работах [7, 8], *Chlorella* способна к доочистке сточных вод от неорганического азота. А облучение ЭМИ КВЧ, согласно проведенным исследованиям, позволяет стимулировать рост микроорганизмов [3, 4, 5] и повысить стойкость микроорганизмов к действию загрязнителей [11, 12, 13]. Загрязнение сточных вод горнодобывающих производств неорганическим азотом – серьезная проблема. Внедрение биотехнологий по очистке сточных вод поможет снизить воздействие предприятий на экосистему и человека.

Материал и методы исследования

Объект исследования – суспензия одноклеточной зеленой водоросли *Chlorella vulgaris*. Перед началом экспериментов *Chlorella vulgaris* выращивалась в течение 7 дней на среде Тамия при комнатной температуре 20°C при естественном освещении. Методика подготовки культуры к экспериментам разработана на основе работы [11]. Работа взята за основу из-за близости тематики исследования и доступности изложения.

Условия эксперимента. Эксперименты, включающие период облучения и период культивирования без облучения, проходили при постоянном искусственном освещении, постоянной температуре 30°C и подаче воздуха 2,5 л/м. Искусственное освещение, аэрация и поддержание постоянной температуры использовались для создания одинаковых условий в экспериментах. Температура 30°C подобрана для исследуемой культуры в серии предварительных экспериментов. Нагреватель АН-1006-1, который находился в аквариуме, заполненном водой, поддерживал постоянную температуру с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$. В аквариум помещались кюветы с суспензией микроводоросли. Уровень воды в аквариуме совпадал с уровнем суспензии в кюветах. Контроль температуры обеспечивался с помощью ртутного термометра. Постоянное освещение поддерживалось лампой LED-1088 Aquarium light, спектр излучения которой совпадал со спектром поглощения *Chlorella vulgaris*. Компрессор М-102 подавал воздух к кюветам по системе трубок, разветвленных параллельно. В качестве кювет использовались стеклянные стаканы В-1-1000 высотой 180 мм и диаметром 95 мм.

Дозиметрия и характеристики излучения. Источник излучения – генератор Г4-141 («Исток», г. Фрязино Московской области, СССР). Прибор генерирует ЭМИ КВЧ в диапазоне 37,5–53,57 ГГц. Эксперименты проводились с шагом в 1 ГГц в диапазоне от 38 до 53 ГГц. Облучение в экспериментах проводилось в режиме непрерывной генерации с экспозицией 8 ч. Стабильность частот в режиме непрерывной генерации не превышала отклонения в 1%. ЭМИ КВЧ передавалось по системе волноводов прямоугольного сечения 5,2x2,6 мм. Система волноводов включала в себя прямой волновод длиной 14,2 см и угловой волновод длиной 2 см с поворотом на 90°. На конце волновода располагалась рупорная антенна прямоугольного сечения с открытым раскрывом размером 22x12,5 мм. Длина антенны 35 мм. Усиление антенны 15,3 dBi. Входное сопротивление 50 Ω. Выбран открытый рупор прямоугольного сечения, так как он создает плоский фронт волны. Раскрыв рупора зафиксирован на расстоянии 25 см над поверхностью суспензии водоросли и на расстоянии 35 см до дна кювет. Расстояние было выбрано исходя из конфигураций антенны и частот таким образом, чтобы изучаемый объект находился в дальней зоне излучения, для однородного удель-

ного поглощения мощности излучения, что снижает влияние объектов на источник излучения. Плотность потока энергии в экспериментах составляла 11,69 мкВт/см². При этом во время экспериментов происходило постоянное перемешивание суспензии потоком воздуха аэратора. Поэтому излучение равномерно воздействовало на весь объем суспензии. В радиусе 1 м от кювет других электрических приборов не было, кроме источника излучения, лампы и нагревателя. Контрольные эксперименты проводились в том же месте, при тех же условиях работы приборов, что и рабочие, за исключением генератора, который не работал во время контрольных экспериментов.

Методика эксперимента. Для эксперимента подготавливалось 1,2 л среды Тамия на дистиллированной воде, в которую добавляли 6 мл маточной культуры *Chlorella vulgaris*, оптическая плотность которой составляла $D=0,378$ при длине волны 560 нм. Полученную маточную суспензию делили на 4 части по 300 мл. Первую часть сразу отбирали для анализа в качестве контрольного образца. Оставшиеся три части культивировали в течение 24 ч. Первые 8 ч культивирования суспензия подвергалась воздействию ЭМИ КВЧ.

Эксперименты проводились с тремя параллельно идущими повторами. Один контрольный эксперимент по культивированию без воздействия проводился с пятью повторами. Всего проведено 17 экспериментов: по одному эксперименту для каждой частоты в диапазоне 38–53 ГГц с шагом 1 ГГц и контрольный эксперимент без облучения (таблица 1).

Методика анализа. После окончания эксперимента каждую из проб суспензии пропускали через мембранный фильтр диаметром 47 мм типа МФАС-ОС-2С. Объем суспензии 300 мл выбран, исходя из методики анализа. Полученные образцы анализировались по «Методике спектрофотометрического определения хлорофилла а» ГОСТ 17.1.4.02 – 90 [14]. Методика основана на спектрофотометрировании ацетонового экстракта проб. С помощью методики

определяли концентрацию биомассы водоросли (ΔB), содержание хлорофилла «а» (С а), «b» (С b), «с1+с2» (С с1+с2), каротиноидов (С k). Для анализа использовался спектрофотометр ПЭ-5400УФ (ООО «Экохим», г. Санкт-Петербург, Россия). Анализ экстрактов проводился на длинах волн 480, 630, 647, 664, 750 нм в соответствии с методикой [14].

Статистическая обработка данных. Для каждого эксперимента рассчитано среднее арифметическое значение показателей. Отношение среднего значения к контрольному значению в конкретном эксперименте показывает, во сколько раз увеличилась концентрация биомассы и/или пигментов. Показатели рассчитаны в относительных единицах. Для установления наличия или отсутствия стимулирующих и угнетающих эффектов рассчитан доверительный интервал по результатам пяти контрольных экспериментов.

Результаты исследования и их обсуждение

Полученные данные представлены в таблице 2 и на рисунке 1. Черными горизонтальными линиями на рисунке 1 показан доверительный интервал для контрольного значения, рассчитанный по пяти повторам эксперимента. В экспериментах параметры культивирования и излучения оставались неизменными, менялась только частота излучения, поэтому наблюдаемые эффекты связываем с изменением частоты.

Биомасса *Chlorella vulgaris*. На рисунке 1 представлены экспериментальные данные изменения биомассы водоросли в суспензии после культивирования в течение 1 суток. Биомасса водоросли в контрольных экспериментах возросла в $4,36 \pm 1,39$ раза. При облучении с частотой 40 ГГц было обнаружено статистически значимое увеличение биомассы водоросли в 2,37 раза по сравнению с контролем (рис. 1). Для частот 38, 39, 41, 43, 47, 50 ГГц не отмечено никакого эффекта. На частотах 42, 44, 45, 46, 48, 49, 51, 52, 53 ГГц наблюдается снижение биомассы относительно контроля.

Таблица 1

Количество экспериментов и повторов опытов

№ экс-та	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Ф ГГц	0	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53
Кол-во повторов	5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

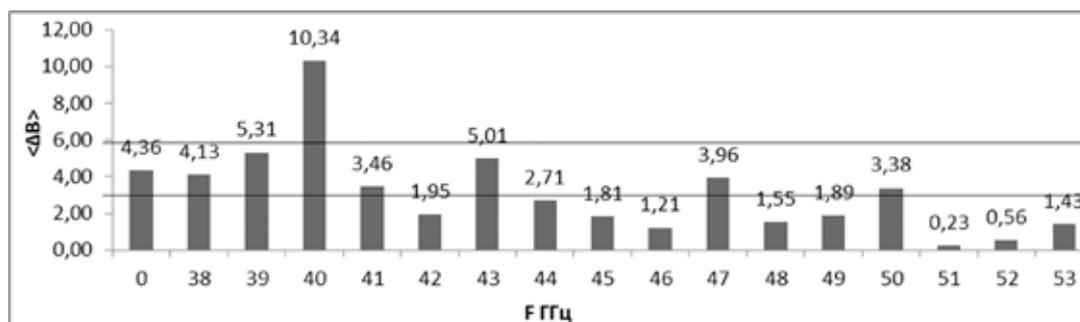


Рис. 1. Изменение концентрации биомассы *Chlorella vulgaris* под воздействием ЭМИ 38-53 ГГц. По оси абсцисс – частота F ГГц. По оси ординат показано, во сколько раз увеличилась концентрация биомассы после культивирования

Таблица 2

Концентрация биомассы и содержание фотосинтезирующих пигментов в суспензии *Chlorella vulgaris*, полученные после облучения

ГГц	$\langle \Delta B \rangle$	С а	С б	С с1+с2	С к
0, контроль	4,36	4,12	3,86	2,88	3,55
38	4,13	3,07	2,80	2,35	3,14
39	5,31	3,73	1,67	2,64	1,82
40	10,34	6,31	2,93	3,54	3,20
41	3,46	1,08	1,44	0,86	1,21
42	1,95	2,67	1,59	1,37	1,18
43	5,01	3,41	3,54	3,14	2,85
44	2,71	2,20	2,89	2,29	2,10
45	1,81	1,55	2,50	1,72	1,99
46	1,21	1,08	1,34	1,02	1,11
47	3,96	2,95	3,68	2,61	4,94
48	1,55	1,41	0,93	0,79	1,17
49	1,89	1,62	2,25	1,56	1,87
50	3,38	2,38	0,81	0,76	0,96
51	0,23	0,30	0,36	0,25	0,48
52	0,56	0,62	1,29	0,60	0,70
53	1,43	1,31	1,44	2,12	1,52

Содержание хлорофилла а. В таблице 2 представлено изменение концентрации хлорофилла «а» в суспензии микроводоросли. Среднее значение в контрольных экспериментах составило $4,12 \pm 1,64$. Доверительный интервал: 2,48–5,76. Согласно полученным данным, облучение на частотах 38, 39, 42, 43, 47 ГГц не приводило к изменению концентрации хлорофилла «а». При облучении на частоте 40 ГГц показатели превышают контрольное значение, что свидетельствует о стимулировании накопления хлорофилла «а». При частотах 41, 44, 45, 46,

48, 49, 50, 51, 52, 53 ГГц результаты ниже контрольных значений.

Содержание хлорофилла б. В таблице 2 показано изменение концентрации хлорофилла «б» в зависимости от частоты. Контрольное значение составило $3,86 \pm 1,81$, доверительный интервал – 2,05–5,67. При воздействии на частотах 39, 41, 42, 46, 48, 50, 51, 52, 53 ГГц отмечено снижение концентрации. При воздействии на частотах 38, 40, 43, 44, 45, 47, 49 ГГц изменения концентрации хлорофилла б обнаружено не было.

Содержание хлорофилла c1 и c2. В таблице 2 показано изменение концентрации хлорофиллов «с1» и «с2» при ЭМИ воздействии. Контрольное значение составило $2,88 \pm 2,16$, доверительный интервал – $0,72 - 5,04$. При воздействии на частотах 51, 52 ГГц отмечено снижение прироста концентрации.

Содержание каротиноидов. В таблице 2 показано изменение концентрации каротиноидов в зависимости от частоты. Контрольное значение составило $3,55 \pm 1,57$, доверительный интервал лежит в диапазоне $1,98 - 5,12$. При воздействии на частотах 39, 41, 42, 46, 48–53 ГГц отмечено снижение прироста концентрации.

Выводы

По результатам исследования было выявлено стимулирующее действие ЭМИ КВЧ на микроводоросль *Chlorella vulgaris* в водной среде на частоте 40 ГГц. Увеличение концентрации биомассы водоросли за сутки составило 10,34. Показатель превышает контрольное значение в 2,37 раз.

Для сравнения полученных результатов взята работа М.Г. Гапочки [11]. В работе М.Г. Гапочки изучалось действие ЭМИ в диапазоне 37,5–53–57 ГГц. Действующие частоты: 37,5, 42,25, 46,95, 53,57 ГГц. Объекты исследования: культуры зеленой микроводоросли *Scenedesmus quadricauda* Breb., инфузории *Spirostomum ambiguum* Ehrem., ракообразного *Daphnia magna* Straus, нефтеокисляющих бактерий *Rhodococcus erythropolis* E-15, люминесцирующих бактерий *Escherichia coli* K12 TG1, почвенные сообщества, иммунокомпетентные клетки [11]. Обнаружены стимулирующие и ингибирующие эффекты облучения. В проведенной нами работе были обнаружены стимулирование при облучении на частоте 40 ГГц и пики концентрации биомассы, не превышающие контрольных показателей, при облучении на частотах 43, 47, 50, 53 ГГц. На частотах 42, 44, 45, 46, 48, 49, 51, 52, 53 ГГц наблюдается снижение биомассы.

Результаты сопоставлены с результатами Н.А. Суховского [10]. В работе Н.А. Суховскому удалось увеличить прирост биомассы *Chlorella vulgaris* в 2 раза в ЭМП (напряженность 15 кВ, длительность воздействия 72 ч). По результатам нашего исследования ускорение роста составило 2,37 раза, что показывает возможность применения ЭМИ 40 ГГц для разработки методик стимулирования *Chlorella*.

Перспективы дальнейших исследований. Результаты работы носят характер предварительного исследования. Они будут полезны в исследованиях ЭМИ КВЧ на *Chlorella*, а также для разработки методов стимулирования роста микроводоросли *Chlorella vulgaris*.

Необходимо изучить роль времени экспозиции на изучаемые эффекты, чтобы подобрать время экспозиции, дающее максимальный прирост биомассы, а также сравнить эффекты воздействия непрерывного и импульсного излучения.

Chlorella vulgaris применяется для восстановления водоемов при цветении [15]. Кроме того, результаты работ [7, 8] показывают возможность очистки сточных вод горнодобывающих производств от неорганического азота. Результаты работы М.Г. Гапочки показывают изменение устойчивости гидробионтов к токсикантам (фенолу, кадмию, кобальту, меди) в водных растворах при воздействии ЭМИ КВЧ. Возможно, ЭМИ КВЧ может помочь в повышении устойчивости *Chlorella* к высоким содержаниям соединений азота. Поэтому разработка методик стимулирования *Chlorella* для очистки вод является перспективным направлением исследований, так же как и изучение комбинированного действия загрязнителей (тяжелых металлов, неорганического азота и фосфора) и электромагнитного излучения на *Chlorella*.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Лаборатории водных экосистем ИППЭС КНЦ РАН, лично заведующему лабораторией Денисову Дмитрию Борисовичу, кандидату биологических наук, а также ведущему инженеру Косовой Анне Львовне за помощь в подборе методики анализа хлорофилла, предоставление возможности проведения анализа на базе лаборатории.

Исследование частично финансировалось из средств гранта РФФИ № 19-05-50065 «Микрочастицы».

Список литературы

1. Бецкий О.В., Девятков Н.Д., Кислов В.В. Миллиметровые волны низкой интенсивности в медицине и биологии // Зарубежная радиоэлектроника. 1996. № 12. С. 3-15.
2. Бецкий О.В., Лебедева Н.Н. Современные представления о механизмах воздействия низкочастотных миллиметровых волн на биологические объекты // Миллиметровые волны в биологии и медицине. 2001. № 3. С. 5-19.
3. Крыницкий П.П., Поливанов М.А., Суханов П.П., Крыницкая А.Ю., Василенко С.В. Избирательность воздействия микроволнового поля на микроорганизмы // Вестник Казанского технологического университета. 2017. № 13. С. 130-132.
4. Кокурин О.Е., Тимаков Н.П., Морозов Г.А., Смирнов С.В. Исследование влияния ЭМП КВЧ-диапазона на ско-

- рость деления микроорганизмов хлебопекарных дрожжей // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 61. С. 25-28. DOI: 10.23670/IRJ.2017.61.015.
5. Кузнецов Д.Б. Перспективы применения электромагнитных излучений крайне высокой частоты малой мощности в фармации // Фундаментальные исследования. 2012. № 10. С.400-404.
6. Кряжев Д.В., Смирнов В.Ф. Новые аспекты применения низкоинтенсивных излучений (КВЧ) в экобиотехнологии // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2010. № 2. С. 418-422.
7. Кирилина Т.В., До Тхи Тху Ханг, Сироткин А.С. Оценка эффективности доочистки сточных вод с использованием одноклеточных и многоклеточных гидробионтов // Вестник Казанского технологического университета. 2013. № 8. С. 200-203.
8. Солнышкова М.А. Снижение загрязнения поверхностных вод неорганическими соединениями азота в зоне воздействия горнодобывающих предприятий Мурманской области: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Санкт-Петербург, 2020. 20 с.
9. Beruto D.T., Lagazzo A., Frumento D., Converti A. Kinetic model of *Chlorella vulgaris* growth with and without extremely low frequency-electromagnetic fields (EM-ELF). *Journal of Biotechnology*. 2014. No. 169. P. 9-14. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2013.10.035.
10. Суховский Н.А. Стимулирование прироста микроводоросли Хлореллы электростатическим полем: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Москва, 2015. 20 с.
11. Гапочка М.Г. Экологические аспекты взаимодействия электромагнитных полей миллиметрового диапазона с биологическими объектами: автореф. дис. ... док. биол. наук. Москва, 2013. 14 с.
12. Шилова Н.А., Линник М.В., Рогачева С.М. Влияние сочетанного действия эми квч и солей тяжелых металлов на микроводоросли *scenedesmus quadricauda* // Экология: синтез естественно-научного, технического и гуманитарного знания. 2012. С. 198-200.
13. Шилова Н.А. Влияние тяжелых металлов на представителей пресноводного фито- и зоопланктона в условиях засоления: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Саратов, 2014. 131 с.
14. ГОСТ 17.1.4.02-90 Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла а. М.: Стандартинформ, 1999. 15 с.
15. Кызлакова А.В. Хлорелла спасает водоемы // Россия молодая. 2014. С. 309-309.

СТАТЬИ

УДК 553.69:552.13

**МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ
ПОРОД ГОРЯЩИХ ТЕРРИКОНИКОВ
ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТОГО СОСТАВА ВОСТОЧНОГО ДОНБАССА**

Артемов И.А., Попов Ю.В., Шарова Т.В.

ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», Ростов-на-Дону, e-mail: iartemov@sfnu.ru

Отходы угледобычи являются перспективным вторичным сырьем, использование которого во многом ограничено разнообразием и непостоянством минерального состава в объеме породных отвалов. В ходе горения терриконов происходят пирометаморфические трансформации, которые частично нивелируют разнообразие фазового состава и приводят к удалению ряда вредных минеральных примесей. При этом состав продуктов пирометаморфизма в определяющей мере зависит от состава исходных пород. Изучение вещественного состава проведено методами электронно-зондовых исследований и рентгенофазового анализа. В статье приводятся результаты изучения минералого-петрографической зональности горелых пород терриконов Восточного Донбасса (район г. Шахты, с. Прохоровка), относящихся к песчано-глинистому литологическому типу. Среди пирометаморфических пород по мере удаления от горящего ядра выделяются зоны с характерными минеральными ассоциациями: для высокотемпературной внутренней зоны (температура выше 1200-1500 °С) характерен парагенезис муллита + кварц, кристобалит, тридимит (породы нередко стекловатые, со следами плавления и течения); более низкотемпературная зона (температура образования от ~800-900 °С до ~1200-1500 °С) выделяется парагенезисом кордиерит + кварц + тридимит + муллита (псевдомуллит); для внешней относительно низкотемпературной зоны характерен парагенезис силлиманит + кварц (в слабо переработанных породах нередко сохраняются реликтовые структурно-текстурные признаки). Процессы стеклообразования и рекристаллизации приводят к повышению однородности минеральных составов и появлению микрокристаллических фаз. В поверхностных и приповерхностных частях терриконов присутствуют фумарольные образования (сульфатные коры гипсового и магниевый-алюмо-аммониевого типов) и «чёрные блоки» с асфальтоподобной корой (безводные сульфаты магния, алюминия, аммония и калия, нашатырь, сера, высокоуглеродистые породы), обязанные своим происхождением пневматолитовым процессам.

Ключевые слова: террикон, горелые породы, техногенное месторождение, пирометаморфизм, муллита, псевдомуллит

**MINERALOGICAL AND PETROGRAPHIC ZONING OF ROCKS
OF BURNING SANDY-ARGILLACEOUS WASTE HEAPS
OF THE EASTERN DONBASS**

Artemov I.A., Popov Yu.V., Sharova T.V.

FGAOU VO "Southern federal university", Rostov-on-Don, e-mail: iartemov@sfnu.ru

Coal mining waste is a promising secondary raw material, the use of which is largely limited by the diversity and variability of the mineral composition in the volume of rock dumps. In the course of burning of waste heaps pyrometamorphic transformations occur, which partially level the diversity of the phase composition and lead to the removal of a number of harmful mineral impurities. At the same time, the composition of pyrometamorphism products depends on a certain extent on the composition of the initial rocks. The material composition was studied by electron-probe methods and X-ray diffraction analysis. The paper presents the results of studying the mineralogical and petrographic zoning of buried rocks of the Eastern Donbass (Shakhty, Prokhorovka village) related to the sandy-argillaceous lithological type. Zones with characteristic mineral associations are distinguished among pyrometamorphic rocks as they move away from the burning core: The high-temperature inner zone (temperature above 1200-1500 °C) is characterized by the paragenesis of mullite + quartz, cristobalite, tridymite (rocks often glassy, with traces of melting and flow); the lower-temperature zone (formation temperature from ~800-900 °C to ~1200-1500 °C) is distinguished by the paragenesis of cordierite + quartz + tridymite + mullite (pseudomullite) the outer relatively low-temperature zone is characterized by the sillimanite + quartz paragenesis (relic structural-textural features are often preserved in weakly processed rocks). The processes of glass formation and recrystallization lead to increased homogeneity of mineral compositions and the appearance of microcrystalline phases. Fumarole formations (sulfate crusts of gypsum and magnesium-aluminum-ammonium types) and "black blocks" with asphalt-like crust (anhydrous magnesium, aluminum, ammonium and potassium sulfates, ammonium, sulfur; high-carbonaceous rocks) are present in the surface and near-surface parts of waste heaps, owing their origin to pneumatolytic processes.

Keywords: waste heap, burned rocks, technogenic deposit, pyrometamorphism, mullite, pseudomullite

Отходы угледобычи эффективно используются в металлургии, сельском хозяйстве, при производстве строительных материалов, керамики и в других отраслях промышленности. Их применение позволяет значительно снизить сырьевые затраты для местных производителей, од-

нако в России менее 5% от общего объема образующихся углеотходов вовлекаются во вторичную переработку [1], при том что на территории России насчитывается не менее 2000 терриконов, содержащих 3.3 млрд м³ породной массы [2]. В немалой мере это связано со сложностью комплексной пере-

работки плохосортированного полиминерального сырья. Порядка 25% отвалов горит за счет экзотермической деструкции сульфидов с выделением серы и окисления частиц угля (рассмотрение определяющих самовозгорание факторов и ссылки на работы в этой области содержатся, например, в статье [3]), и значительная часть является перегоревшими, что приводит к трансформациям минерального состава пород, способствующим удалению части вредных компонентов (сульфиды и пр.), повышению однородности петрографического состава и физических свойств пород, а также появлению ряда их новых свойств. В силу различий литологического состава породной массы актуально изучение состава горелых пород разных угольных бассейнов и представленных в них литологических типов.

Основными задачами исследования являются изучение закономерностей пирометаморфических преобразований, состава минеральных ассоциаций и создаваемой ими минералого-петрографической зональности в породной массе. Полученная информация призвана повысить эффективность разработки технологических схем использования горелых пород, в первую очередь как сырья для керамической промышленности (отошители и интенсификаторы спекания в керамике и пр.). Не менее интересны эти объекты и как «природные лаборатории» для исследования закономерностей техногенного минералообразования в ходе пирометаморфических и пневматолитовых процессов, сопровождающихся кристаллизацией специфических минеральных ассоциаций [2; 4; 5].

Материалы и методы исследований

В работе приводится описание минералого-петрографического состава горелых пород терриконов Восточного Донбасса, имеющих песчаниково-алевролит-аргиллитовый с частицами угля состав исходных пород, и характеризуется типичная для них зональность производных пирометаморфизма. Источником отвалов служат породы дяконовской, смоляниновской, белокалитвенской, каменской, алмазной, горловской свит среднего карбона. В каменской и горловской свитах наибольшим распространением пользуются песчаники и аргиллиты (на каждую разновидность пород приходится ~40% мощности разреза), в смоляниновской и дяконовской свитах преобладают алевролиты и аргиллиты (до 90%), в белокалитвенской и алмазной – алевролиты

и песчаники (аргиллитов до 20%), во всех свитах присутствие известняков незначительно. По литологическому составу изучаемые терриконы можно отнести к песчано-глинистому литологическому типу [6].

Основными объектами изучения послужили терриконы трех шахт Восточного Донбасса с однотипным литологическим составом, в которых обнажены разные участки горелых пород активной зоны. Шахта им. Пролетарской Диктатуры расположена в г. Шахты; отсыпка её породного отвала началась после 1923 г. и закончилась в 1972-1974 годах. Терриконик состоит из нескольких вершин, некоторые из них находятся в активной стадии горения (вершины окрашены в ярко-рыжий цвет, на поверхности развиты фумарольные каналы и крышки с выходами горячих паров и газов); высота терриконика в наивысшей точке составляет 30 метров. Отвал частично разрабатывается; для изучения в пределах отвала доступны породы преимущественно поверхностных частей, в том числе фумарольные образования. Террикон шахты им. Артёма также расположен в г. Шахты; эксплуатировался с 1911 по 1995 г.; высота около 30 м. Терриконик полностью перегоревший, разрабатывается, что позволяет провести изучение и опробование внутренних частей активной зоны, вплоть до участков плавления пород (среди пород наблюдаются многочисленные жилы и желваки застывших расплавов, представляющие собой черные, губчатые, пористые прожилки в керамоподобной перегоревшей породе). Террикон шахты № 62 находится в с. Прохоровка; эксплуатировался с 1920-х годов по 1994 г.; высота около 15 м. Отвал состоит из двух вершин, одна из которых наполовину выработана (как материал для дорожно-строительных работ), вследствие чего вскрыты наиболее глубокие зоны активной части террикона. В составе отвала широко представлены отвальные спёки с обломками перегоревших ярко-желтых пород, образованных за счет аргиллитов и алевролитов, а также черные тяжелые пористые шлакоподобные породы со следами течения и вспенивания.

Изучение вещественного состава проведено методами растровой электронной микроскопии, электронно-зондового микроанализа (полированные напыленные углеродом препараты изучались на микроскопе Tescan VEGA II LMU с системой энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450/XT) и рентгенофазового анализа (порошковые препараты анализируют

вались на дифрактометре ARLX'TRA с излучением $\text{CuK}\alpha_1$ 1,5406 Å, $\text{CuK}\alpha_2$ 1,5444 Å), результаты которых дополняют ранее проведенные исследования углеотвалов Ростовской области [6; 7]. Основной объем исследований выполнен на базе центра коллективного пользования научным оборудованием «Центр исследований минерально-сырья и состояния окружающей среды» Южного федерального университета.

Результаты исследования и их обсуждение

В общем виде в строении террикона прослеживается зональность с выделением зоны выветривания, зоны фумарольных образований на поверхности террикона и «чёрных блоков» с асфальтоподобной корой, обязанных своим происхождением пневматолитовым процессам, и активной зоны внутри террикона, подразделяемой по уровню пирометаморфических преобразований пород. Минералого-петрографический состав метаспоров терриконов определяется изменением условий, контролируемых генерируемыми в очаге горения температурой и флюидным потоком, а также составом протолита. На внутреннее строение террикона влияет множество факторов, в том числе форма породного отвала (конический, хребтовой или плоский отвала по-разному аккумулируют тепло и подвергаются воздействию природных факторов), его литологический и гранулометрический состав (в разное время отвал отсыпается разными по своим свойствам породами), количество угольного и сульфидного материала в породе, также количеством доступного кислорода и воды, которые ускоряют окисление угля и сульфидных минералов.

Фумарольные образования приурочены к окислительно-восстановительному геохимическому барьеру на поверхности отвала, представляют собой белые и желтые пористые хрупкие агрегаты часто с трубчатым строением; образуют сульфатные коры магний-алюмо-аммониевого и гипсового минеральных типов [8]. Первый тип имеет разнообразный минеральный состав (рис. 2а) – сложен сульфатами алюминия, магния, кальция аммония и их кристаллогидратами (ведущие минералы – гипс, эпсомит, буссенготит, годовиковит, алюминит, чермигит, тонкодисперсный кварц и углеродная сажа), и обладает в разной мере выраженным зональным строением, определяемым приуроченностью водных сульфатов к верхней

зоне и безводных сульфатов – к нижней. Второй тип сложен преимущественно гипсом и самородной серой.

Асфальтоподобные коры образованы кавернозными прочными агрегатами, в целом имеющими сходный состав с поверхностными фумарольными отложениями, в них преобладают безводные сульфаты магния, алюминия, аммония и калия, нашатырь, сера.

Рассмотренный комплекс пород образован в ходе пневматолитового переноса и отложения продуктов сернокислотного с участием аммиака разложения алюмосиликатных пород терриконов и поступивших из нижележащей зоны «чёрных блоков» продуктов битумов и углей.

«*Чёрные блоки*» представлены черными (за счет насыщенности углеродистым веществом) массивными плотными агрегатами, сложенными преимущественно слабокристаллизованным муллитом с кварцем, кристобалитом, силлиманитом. В изученных терриконах эти образования маломощные и представлены фрагментарно, что объясняется низким содержанием глинистых компонентов (их формирование связано с метаморфизмом глинистых углесодержащих пород в условиях сильно ограниченного доступа кислорода для горения [3]). Флюидогенно-преобразованные высокоуглеродистые породы образуются при температурах до 500 °С на путях движения флюидов [9] и залегают среди продуктов глубокого обжига, обрамляющих очаг активного горения.

В составе пирометаморфических пород терриконов по результатам минералого-петрографических исследований можно выделить три зоны, различающиеся минеральными парагенезисами, отражающими разные условия минералообразования (в первую очередь температурные) и распределение разных петрографических разностей в составе преобразованного отвала (рис. 1).

Породы первой (внешней) зоны, в ряде работ определяемые как «обожжённые породы», образуют осыпи обломков белого, бледно-желтого и бледно-розового цвета, со скрыто- и мелкокристаллической структурой, легкие, хрупкие, трещиноватые, частично сохранившие структурно-текстурные признаки пород протолита и реликтовые минералы (гидрослюды, каолинит, альбит-олигоклаз, ортоклаз, кварц и пр.). Для их высокотемпературных разностей характерна метаморфическая силлиманит-кварцевая минеральная ассоциация.

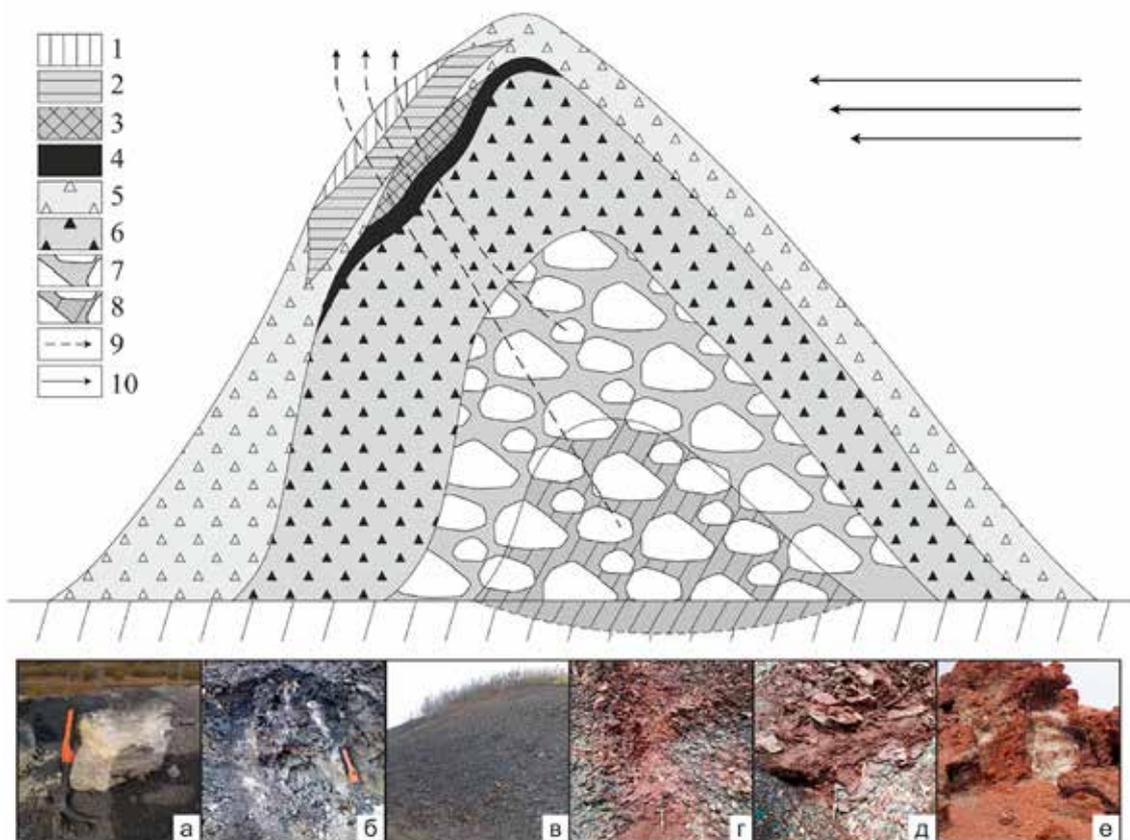


Рис. 1. Схема строения горящего породного отвала:

1 – фумарольные коры гипсового состава; 2 – фумарольные коры магний-алюмо-аммониевого типа; 3 – асфальтоподобная кора; 4 – «черный блок»; 5 – осыпи негорелых пород; 6 – породы первой (низкотемпературной) зоны; 7 – породы второй (среднетемпературной) зоны; 8 – породы третьей (высокотемпературной) зоны; 9 – направление движения парогазового потока; 10 – направление преобладающих ветров: а – фумарольные коры, б – асфальтоподобная кора, в – осыпи негорелых пород, г – породы первой зоны; д – породы второй зоны; е – породы третьей зоны

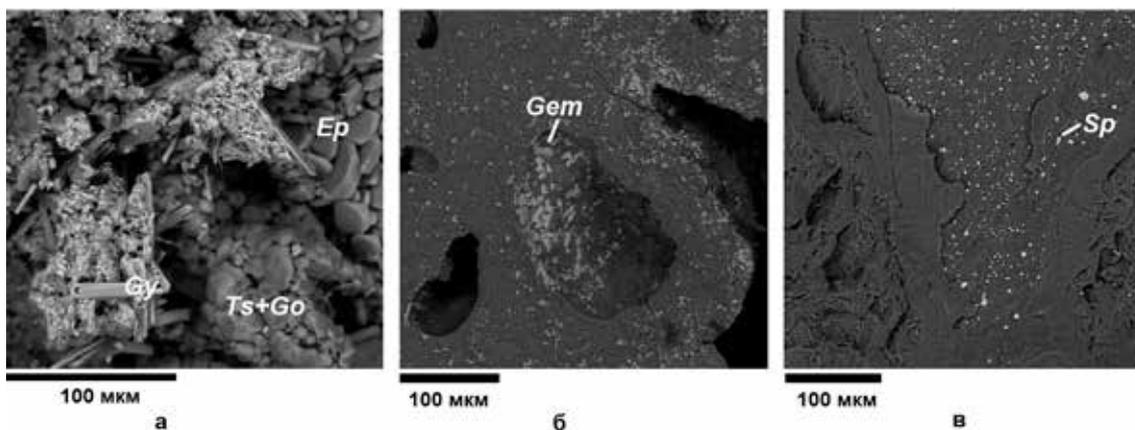


Рис. 2. Строение некоторых характерных пород террикоников:

а – ассоциация минералов магний-алюмо-аммониевого типа фумарольной коры; б – микрокристаллическая, частично аморфизованная, кордиерит-кварц-тридимит-муллитовая с гематитом порода второй зоны; в – стекловатая со следами течения, содержащая муллит, кварц и шпинель, порода третьей зоны.

Обозначения минералов: Ep – эпсомит, Gem – гематит, Go – годовиковит, Gy – гипс, Sp – шпинель, Ts – чермизит

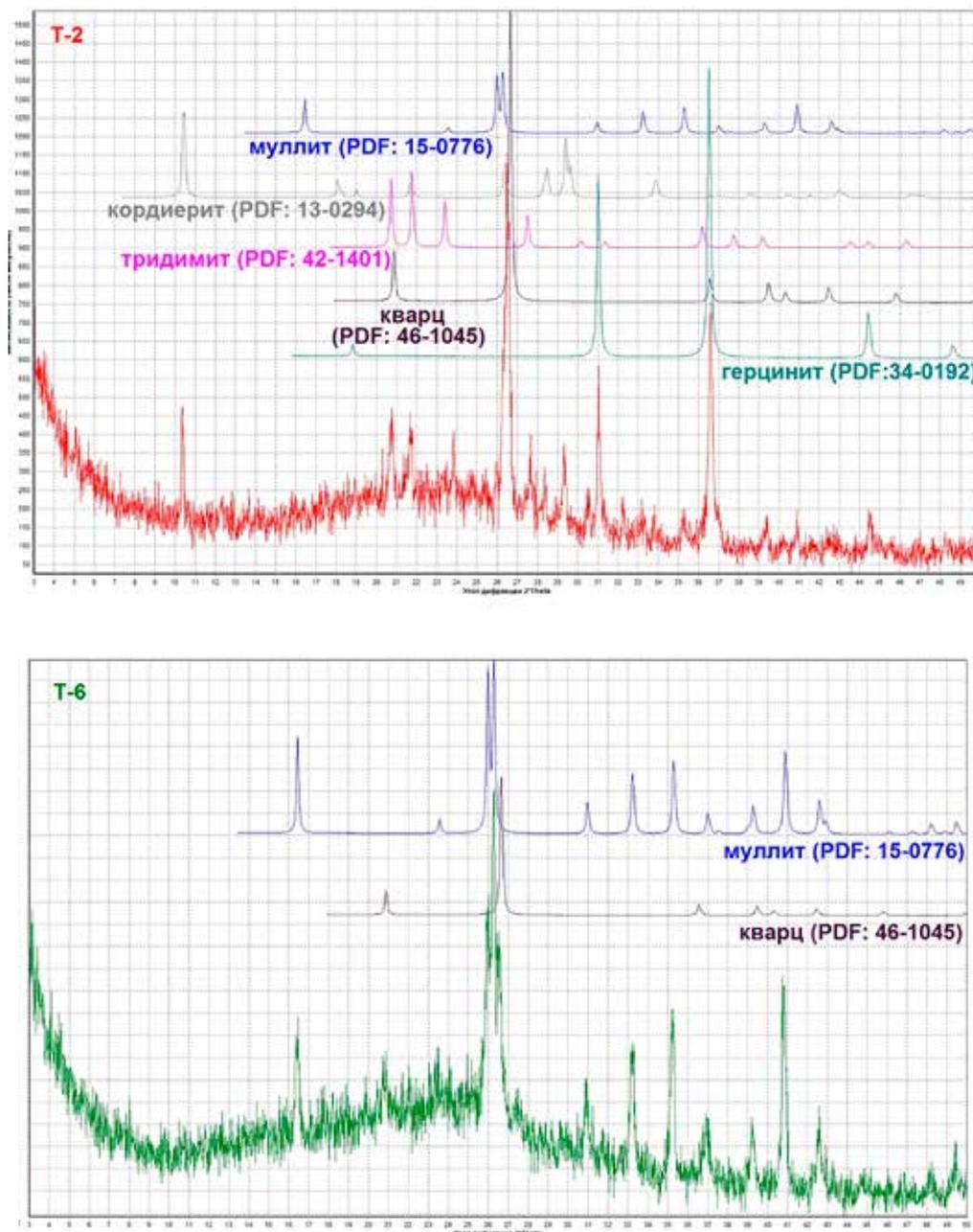


Рис. 3. Характерные дифрактограммы образцов второй (Т-2; метааргиллит) и третьей (Т-6; массивная микрокристаллическая порода) минерало-петрографической зон терриконов. Приведены дифрактограммы идентифицированных фаз из базы PDF-2 (в скобках указаны номера карточек)

Следует отметить, что породы этой зоны частично аморфизуются, в них формируются микрокристаллические фазы, что повышает их реакционную активность. На обнаженной части описываемых пород наблюдаются многочисленные друзовые сростки плоских кристаллов гипса.

Породы второй зоны преимущественно красного, розового цвета, иногда зеленые внутри, массивные, прочные трещиноватые,

утратившие реликтовые структурно-текстурные особенности (рис. 2б), содержащие стекловатый материал и несущие признаки оплавления и спекания. Характерная минеральная ассоциация – кордиерит-кварц-тридимит-муллитовая (псевдомуллитовая) со шпинелью, гематитом, кристобалитом, оливином (рис. 3, обр. Т-2). Оценка температурных условий образования этой минеральной ассоциации определяется образова-

нием муллита из метаглинистых минералов, исходя из температуры, которая составляет ~900-1000 °С [10], его образованию предшествует появление псевдомуллита (при ~800 °С). Реакция псевдомуллит → муллит + кристобалит приводит к рекристаллизации с образованием стабильной ассоциации кордиерит-муллит-кристобалит, что определяет нижний температурный рубеж данной зоны, близкий к 800-900 °С, также ограничивающий диапазон стабильного сосуществования андалузита и кварца [11]. Среди пород этой зоны, как и в вышележащей зоне, отмечаются «черные блоки», обогащенные сажистым углеродом.

Породы третьей, наиболее высокотемпературной, зоны окрашены в бурый и черный цвет, встречаются пестроокрашенные разности, в большей степени сложены стеклом; представлены клинкерами с жилами и линзами застывшего расплава и черного пористого шлакоподобного агрегата со следами течения и вспенивания (рис. 2в). Породы массивные, фарфоровидные и очень прочные. Ассоциирующий с аморфной фазой или слагающий мелкокристаллические породы парагенезис – муллит + кварц, кристобалит, тридимит, реже отмечаются санидин и микрофазы железистого оливина, силлиманита, кордиерита, шпинели, гематита, магнетита (рис. 3, обр. Т-6). Наблюдаемая на дифрактограммах однородность состава позволяет предполагать развитие процессов муллитизации силлиманита и кордиерита, протекающих при температурах выше 1200-1500 °С (и сильно зависящую от размера минеральных зерен и содержания щелочей).

Заключение

Приведённые результаты исследований характеризуют минералого-петрографическую зональность в горелых породах угольных отвалов песчаниково-алевролит-аргиллитового состава (по [6] – песчано-глинистого литологического типа), характерных для восточной части Донецкого бассейна. В отличие от хорошо изученных в минералогическом плане горельников Челябинского угольного бассейна [3; 4], они характеризуются низким содержанием карбонатов, что проявляется в незначительном развитии высокотемпературных кальций-содержащих силикатов (при этом не обнаружены высококальциевые фазы – ларнит, спуррит, афанасьевит и пр.), в отсутствие связанных с щелочным геохимическим барьером ассоциаций (содержащих кальций-ферритовые минералы, например ацикулит),

в слабой дифференцированности состава фумарольных кор. Среди пирометаморфических пород по мере удаления от горящего ядра выделяются зоны с характерными минеральными парагенезисами: муллит + кварц + кристобалит → кордиерит + кварц + тридимит + муллит (псевдомуллит) → силлиманит + кварц, тридимит, кристобалит → метаосадочные породы с первичными минералами и структурно-текстурными признаками (значительная доля кварца в составе ассоциаций является унаследованной от протолита). Во внутренних зонах процессы рекристаллизации и стеклообразования приводят к повышению однородности минеральных составов и появлению микрокристаллических фаз. Полученные результаты представляют интерес при проектировании рациональных схем отработки и промышленного использования пирометаморфически преобразованных пород терриконов или целенаправленного отжига пород терриконов для достижения желаемых свойств на территории Восточного Донбасса.

Список литературы

1. Шпирт М.Я., Горлов Е.Г., Шумовский А.В. Концепция технологического комплекса переработки отходов добычи и обогащения углей с получением широкого спектра товарной продукции // Химия твердого топлива. 2019. № 6. С. 35-40.
2. Воробьев А.Е., Портнов В.С., Маусымбаева А.Д., Бекетова М.С. Изменение качества углепородной массы в терриконах // Труды университета. 2016. № 3(64). С. 61-65.
3. Портола В.А., Протасов С.И., Бобровникова А.А., Сергин Е.А. Оценка длительности инкубационного периода самовозгорания углесодержащих пород отвалов // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2020. № 4. С. 36-41.
4. Чесноков Б.В., Щербакова Е.П. Минералогия горелых отвалов Челябинского угольного бассейна (опыт минералогии техногенеза). М.: Наука, 1991. 152 с.
5. Щербакова Е.П. Краткий очерк минералогии горелых угольных отвалов // Уральский геологический журнал. 2018. №4 (124). С.14-29.
6. Гипич Л.В. Особенности вещественного состава отвальных пород шахтных отвалов Восточного Донбасса и новые направления их использования: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Ростов-на-Дону, 1998. 25 с.
7. Буравчук Н.И., Гурьянова О.В. Использование техногенного сырья в производстве нерудных строительных материалов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2015. № 1 (182). С. 111-117.
8. Артемов И.А., Попов Ю.В. Минералы фумарольных образований горящего терриконика шахты «им. Пролетарской диктатуры» (г. Шахты) // Инновационные перспективы Донбасса: материалы 6-й Международной научно-практической конференции (Донецк, 26-28 мая 2020 г). Том 6. Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2020. С. 10-12.
9. Гамов М.И., Рылов В.Г., Мещанинов Ф.В., Наставкин А.В. Термобарогеохимическое моделирование процессов преобразования породных отвалов угольных шахт Восточного Донбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 11. С. 158-168.
10. Абдрахимов В.З., Колпаков А.В., Денисов Д.Ю. Кристаллизация муллита при синтезе керамических материалов из отходов производств // Концепт. 2013. Т. 3. С. 2716-2720.
11. Бережной А.С. Многокомпонентные щелочные оксидные системы. Киев: Наукова думка, 1988. 193 с.

УДК 614.2:614.771:629.78:551.4:523.3

КАЧЕСТВО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА РЕГОЛИТА И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА УСЛОВИЯ ОСВОЕНИЯ ГОРНЫХ МАТЕРИКОВЫХ РАЙОНОВ ЛУНЫ

Гавришин А.И.

*Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова,
Новочеркасск, e-mail: agavrishin@rambler.ru*

В настоящее время большое внимание уделяется использованию космических природных ресурсов и, прежде всего, полезных ископаемых на Луне. Эту проблему поставили и успешно развивают космические агентства России, Соединенных Штатов Америки, Китая, стран Европейского Союза и многих других стран. Цель исследования: оценить опасность освоения Луны и дать прогноз вероятного влияния микроэлементного состава реголита на здоровье будущих селенавтов, геохимическую характеристику реголита (лунного ландшафта) и земной почвы, оценку коэффициента концентрации и коэффициента уменьшения качества реголитов. Основным объектом исследований для оценки опасности освоения Луны выбраны реголиты, доставленные космическими экспедициями «Луна-20» и «Аполлон-16» из горных материковых районов. При работе селенавтов на поверхности Луны следует учитывать ряд негативных факторов: практическое отсутствие атмосферы и кислорода, очень низкую температуру, космическое излучение, падение метеоритов, лунную пыль и многие другие. В связи с этим выполнены геохимическая (селенохимическая) характеристика лунного ландшафта и анализ вероятного влияния химического состава реголита на состояние и здоровье будущих селенавтов. В данной работе произведена оценка качества микроэлементного состава реголита путем сравнения его химического состава с составом земных почв. Рассчитанный для материковых реголитов коэффициент уменьшения качества соответствует категории «кризис». Это свидетельствует о том, что в реголитах ряд микроэлементов содержится в концентрациях, значительно превышающих концентрации в земных почвах. К таким элементам, прежде всего, относятся Ni, Cr, Co, Ag, Au и лантаниды Ho и Er. Это важно учитывать при колонизации Луны, так как высокие концентрации указанных химических элементов могут оказывать негативное влияние на здоровье селенавтов и вызывать аллергические реакции, раздражение глаз, нарушение дыхания, умственной и физической работоспособности.

Ключевые слова: Луна, качество реголита, геохимия горных ландшафтов, опасность для здоровья, лунные колонисты, освоение Луны

THE QUALITY OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF REGOLITH AND ITS INFLUENCE ON THE CONDITIONS FOR THE DEVELOPMENT OF THE MOUNTAINOUS CONTINENTAL REGIONS OF THE MOON

Gavrishin A.I.

*South Russian State Polytechnic University named M.I. Platov, Novocherkassk,
e-mail: agavrishin@rambler.ru*

Currently, much attention is paid to the use of space natural resources and, above all, minerals on the Moon. This problem has been posed and is being successfully developed by the space agencies of Russia, the United States of America, China, the European Union and many other countries. To assess the danger of lunar exploration and to predict the possible influence of the microelement composition of regolith on the health of future lunar colonists. Geochemical characteristics of regolith and terrestrial soil; assessment of the concentration coefficient and the total indicator of reducing the quality of regoliths. The main object of research to assess the danger of lunar exploration is the regolith's delivered by the Luna-20 and Apolon-16 space expeditions from mountainous continental areas. With a long stay of a person on the moon, it is necessary to take into account a number of negative factors: the practical absence of the atmosphere and oxygen, very low temperature, cosmic radiation, the fall of meteorites, lunar dust and many others. In this regard, the study of the possible influence of the chemical composition of lunar regolith on the state and health of a person was carried out. In this paper, the quality of the microelement composition of regolith is assessed by comparing its chemical composition with the composition of terrestrial soils. The quality reduction indicator calculated for this regolith's was almost the same and corresponds to the category of «crisis». This indicates that in regoliths a number of trace elements are contained in concentrations significantly higher than concentrations in terrestrial soils. Such elements primarily include Ni, Cr, Co, Ag and Au, as well as the lanthanides Ho and Er. This is important to consider when colonizing the Moon, since high concentrations of these chemical elements can have a negative impact on the health of selenauts and cause allergic reactions, eye irritation, and respiratory failure, mental and physical performance.

Keywords: Moon, regolith quality, geochemistry of mountain landscapes, hazard, health of lunar colonists, lunar exploration.

Изучение и освоение Космоса являются одной из самых заветных целей человечества. И особый интерес вызывает Луна – ближайший космический сосед Земли. Это единственный в настоящее время космический объект, на котором побывал

человек, с которого доставлены на землю и проанализированы образцы пород. Поставлен вопрос о разработке на Луне полезных ископаемых.

С проблемой колонизации Луны тесно связаны вопросы необходимости изучения

геохимии (селенохимии) лунных ландшафтов, реголита и земной почвы, сравнения химического состава реголита с составом земной почвы и определения возможного влияния состава реголита на состояние и здоровье селенавтов. В связи с этим основная цель исследований – оценить опасность освоения Луны и дать прогноз вероятного влияния микроэлементного состава реголита на здоровье будущих лунных колонистов.

По результатам изучения Луны опубликовано большое количество работ, в которых рассматриваются вопросы генезиса, свойств и состава лунных пород. Например, проблемы освоения Луны рассмотрены в публикациях [1, 2, 3]; общий химический состав лунных ландшафтов и реголитов – в [4, 5]; состав отдельных образцов реголитов – в [6, 7, 8]; состав земных почв – в [9, 10]; методические аспекты исследований отражены в публикациях [2, 10, 11]; проблемы космической медицины и заболеваний рассмотрены в [12, 13, 14]. Автором опубликовано несколько статей по геохимии лунных пород и стекол [7, 11].

В последнее время большое внимание уделяется проблеме использования космических природных ресурсов и, прежде всего, полезных ископаемых на Луне [1, 2, 3]. Подчеркивая важность изучения и освоения Луны, еще в прошлом веке ее назвали седьмым континентом Земли. Предложены многочисленные проекты освоения лунной поверхности и возведения сооружений для размещения жилых комплексов, лабораторий и производств. Предлагается использовать для этого лунный реголит и самые современные технологии возведения сооружений [1, 3].

Лунный реголит – это рыхлый покров обломочного материала, включающий камни и обломки разных размеров, смещенные с места своего залегания. Реголит образуется под воздействием ударно-взрывных процессов кратерообразования с участием перемещения вещества вниз по склонам и некоторых других процессов.

Деятельность селенавтов на поверхности Луны связана с высоким риском для здоровья и жизни. Человек попадает в очень агрессивные условия, которые требуют использования мощных средств индивидуальной защиты. Необходимо учитывать следующие факторы: почти нулевое давление на поверхности и практическое отсутствие газовой атмосферы, низкую температуру (до -160°C), низкую гравитацию,

отсутствие магнитного поля, незащищенность от космического излучения, возможность столкновения Луны с крупными метеоритами и др. [3].

Эти проблемы обуславливают высокую актуальность детального изучения лунного реголита, необходимость оценки его качества путем сравнения его химического состава с составом земной почвы и выделения химических элементов, концентрации которых значительно выше в реголите и которые могут оказать отрицательное влияние на состояние и здоровье будущих селенавтов. В данной работе основное внимание уделено изучению геохимии лунного ландшафта и оценке качества химического состава реголита по анализам проб, отобранных в горных материковых районах Луны космическими экспедициями «Луна-20» и «Аполлон-16» [4–8].

Материалы и методы исследования

В настоящей статье для оценки опасности при освоении лунной поверхности и при разработке полезных ископаемых применен широко известный в геохимии и геоэкологии метод расчета коэффициента концентрации (R_i) и коэффициента уменьшения качества (P_c) [7, 10]. Выделено пять категорий опасности: «норма», «риск», «кризис», «бедствие» и «катастрофа» (табл. 1). Коэффициент концентрации i -го компонента рассчитывается по следующей формуле:

$$R_i = C_i / C_n,$$

где C_i – концентрация компонента в реголите, C_n – фоновая концентрация компонента в земной почве.

Качество почв и окружающей среды по n компонентам оценивается по коэффициенту уменьшения качества:

$$P_c = \sum_i K_i - (n - 1).$$

Таблица 1

Категории качества

Значение коэффициента	Название категории
<2	Норма
≥2–16	Риск
≥16–128	Кризис
≥128–1024	Бедствие
≥1024	Катастрофа

Чем больше величина коэффициента уменьшения качества, тем ниже качество

реголита. Например, значение коэффициента, равное 14, соответствует категории «риск», а значение, равное 200, соответствует категории «бедствие». В данной работе использованы фоновые концентрации микроэлементов в земной почве [9, 10] и в реголитах, полученных экспедициями «Луна-20» и «Аполлон-16» [3–8].

В последнее время значительные исследования о влиянии на здоровье человека недостатка, избытка или дисбаланса микроэлементов выполнены в рамках новых научных дисциплин «Медицинская геология» и «Медицинская геохимия» [12, 13, 14]. Все это позволило сделать прогноз возможного влияния на здоровье селенавтов микроэлементов, концентрации которых в лунном реголите значительно выше, чем в земных почвах.

Например, высокие концентрации в реголитах хрома могут вызвать такие заболевания, как дерматит, язва желудка, нарушение сердечной деятельности; никеля – ишемическая болезнь сердца, саркома, ухудшение зрения; кобальта – астма, гипертензия щитовидной железы и др. Повышенные концентрации лантанидов относятся к токсичным. Даже очень высокие содержания Au и Ag могут оказываться вредными для здоровья и вызывать дерматит, стоматит, диарею.

Необходимо отметить также негативное влияние на здоровье и самочувствие селенавтов лунной пыли. В обзорной работе [2] детально и всесторонне охарактеризованы свойства лунной пыли и рассмотрена ее потенциальная опасность. Более 95% массы реголита составляют частицы менее 1 мм. Частицы <100 мкм относятся к лунной пыли. Средний размер лунной пыли – от 40 до 100 мкм, и эти частицы составляют около половины массы реголита. Форма пылевых частиц разнообразна, они имеют ярко выраженные заостренные края, что обуславливает их очень высокую негативную особенность. Оказалось, что скорость вращения левитирующих микронных и субмикронных частиц на Луне может составлять миллионы оборотов в секунду. Видимо, эта особенность обуславливает высокую токсичность и агрессивность воздействия на поверхности приборов и способность проникать сквозь герметические уплотнители. Абразивные свойства пыли приводили к тому, что циферблаты многих приборов были настолько поцарапаны, что было невозможно прочитать показания.

Качество реголита «Луна-20»

Автоматическая станция «Луна-20» совершила посадку в типичном материковом районе Луны в феврале 1972 г., на северо-восточной оконечности Моря Изобилия (Foecunditatis). Рельеф района посадки типичен для материковых областей. На Землю доставлено 55 г реголита [4]. Образец характеризуется относительно невысоким содержанием вторичных частиц, в нем преобладают породы анортозитового типа.

По результатам космической экспедиции «Луна-20» произведены геохимическая характеристика материкового ландшафта и сравнение химического состава земных почв и реголита, выполнена оценка качества химического состава горного реголита путем расчета коэффициента уменьшения качества реголита по концентрациям 34 элементов (табл. 2).

По величине коэффициента уменьшения качества (Pc), который равен 35,18, ситуация относится к категории «кризис». В материковом лунном реголите обнаружен ряд химических элементов, концентрации которых значительно превышают их содержание в земной почве. К таким элементам относятся Cr, Ni, Co, Sc, Ag и Au, а также лантанид Ho. Все это важно учитывать при организации поселений и разработке полезных ископаемых на Луне.

Достижения современной медицинской геологии позволяют сделать предположения о возможном влиянии на состояние и здоровье лунных колонистов повышенных концентраций некоторых обнаруженных микроэлементов, которые приведены выше.

Качество реголита «Аполлон-16»

«Аполлон-16» (Apollo 16) — десятый пилотируемый полет в рамках программы «Аполлон», состоявшийся 16–27 апреля 1972 г. Это пятая высадка людей на Луну. В ходе полета «Аполлона-16» лунный модуль «Орион» осуществил посадку в высокогорном материковом районе Луны на плато Кэйли (Cayley Plains) [4, 5]. Астронавтами было собрано и доставлено на Землю 95,7 кг лунных образцов.

По результатам космической экспедиции «Аполлон-16» произведены геохимическая характеристика материкового ландшафта и сравнение химического состава земных почв и реголита, выполнена оценка качества химического состава горного реголита путем расчета коэффициента уменьшения качества реголита по концентрациям 34 микроэлементов (табл. 3).

Таблица 2

Геохимическая характеристика материкового лунного ландшафта
и оценка качества горного реголита «Луна-20»

Элемент	Концентрация		R_i	Элемент	Концентрация		R_i
	Земля	Луна			Земля	Луна	
Ba	500	120	0,24	Sb	1	0,2	0,2
Co	9	30	3,3	Au	1	7,8	7,8
Cs	3	0,2	0,07	Sr	300	230	0,77
Cu	25	27	1,1	La	40	9,7	0,24
Zn	60	76	1,27	Ce	60	24,5	0,41
Ga	20	3,4	0,17	Pr	7	3,3	0,47
Se	0,4	0,2	0,5	Nd	33	16,6	0,5
Rb	150	2	0,013	Sm	5	4,5	0,9
Sc	7	16	2,3	Eu	1,5	1,1	0,73
Nb	24	6,8	0,28	Gd	4	5,5	1,37
Ni	20	194	9,7	Tb	0,65	0,78	1,2
V	90	54	0,6	Dy	4	5,5	1,4
Zr	300	400	1,38	Ho	0,6	1,2	2,0
Ag	70	720	14,4	Er	2	3	1,5
Pb	20	1,2	0,06	Tm	0,6	0,48	0,8
Cr	70	780	11,14	Yb	3	2,4	0,8
Sn	4,5	3	0,67	Lu	0,4	0,4	1,0
P_c							35,18

Таблица 3

Геохимическая характеристика материкового лунного ландшафта
и оценка качества горного реголита «Аполлон-16»

Элемент	Концентрация		R_i	Элемент	Концентрация		R_i
	Земля	Луна			Земля	Луна	
Ba	500	140	0,28	Sb	3	0,045	0,015
Co	9	26	2,9	Au	1	10	10
Cs	3	0,12	0,04	Sr	300	188	0,63
Cu	25	7	0,28	La	40	13	0,38
Zn	60	29	0,48	Ce	60	30	0,5
Ga	20	5,2	0,26	Pr	7	4,6	0,15
Se	0,4	0,28	0,7	Nd	33	15	0,3
Rb	150	2,3	0,015	Sm	5	5	1,0
Sc	7	10	1,43	Eu	1,5	1,2	0,8
Nb	24	11	0,46	Gd	4	5	1,25
Ni	20	380	19	Tb	0,65	1,1	1,69
V	90	25	0,28	Dy	4	7	1,75
Zr	300	200	0,67	Ho	0,6	1,5	2,5
Ag	70	340	4,8	Er	2	4	2,0
Pb	20	2,3	0,12	Tm	0,6	0,7	1,17
Cr	70	600	8,57	Yb	3	4,6	1,53
Sn	4,5	0,5	0,11	Lu	0,4	0,6	1,5
P_c							34,28

Результаты оценки качества химического состава реголита «Аполлон-16» очень близки к результатам оценки реголита «Луна-20». По величине коэффициента уменьшения качества (P_j), который равен 34,28, ситуация относится к категории начального кризиса (табл. 1). В лунном реголите обнаружен ряд химических элементов, концентрации которых значительно превышают их содержание в земной почве. К таким элементам относятся Ni, Cr, Co, Ag и Au, а также лантаниды Ho, Er. Все это важно учитывать при организации поселений на Луне. Как показано выше, высокие концентрации перечисленных микроэлементов могут вызывать целый ряд легочных, сердечно-сосудистых и желудочно-кишечных заболеваний.

Заключение

В данной работе выполнена геохимическая характеристика лунного ландшафта в материковом районе Луны и изучено качество горных реголитов, доставленных космическими экспедициями «Луна-20» и «Аполлон-16». Для изучения вероятного воздействия микроэлементного состава материковых реголитов на здоровье будущих селенавтов использованы концентрации 34 химических элементов. Установлено, что концентрации ряда микроэлементов в горных реголитах намного превышают их концентрации в земных почвах, это может оказывать негативное влияние на здоровье селенавтов при работе на лунной поверхности и при разработке полезных ископаемых.

К таким опасным для здоровья селенавтов микроэлементам относятся Ni, Cr, Co, Ag и Au, а также лантаниды Ho и Er. Это важно учитывать при колонизации Луны, так как высокие концентрации указанных химических элементов могут вызывать аллергические реакции, раздражение глаз, нарушение дыхания, умственной и физической работоспособности.

К размещению на Луне собственных баз готовятся несколько крупных держав: Россия [3, 4], США [5], Китай [8], Индия, Япо-

ния, страны Европейского Союза, а также несколько частных компаний. Планируется использовать естественный спутник Земли как ресурсную базу (энергия, гелий, лед, различные составляющие реголита), опытный и научный полигон, где будут тестироваться космические технологии для дальних полетов, в том числе на Марс.

Список литературы

1. Жданова Д.Н., Шмарин Н.В. Луна – проблемы и перспективы связанные с освоением // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2018. Т. 3. № 4 (14). С. 555-556.
2. Захаров А.В., Зеленый Л.М., Попель С.И. Лунная пыль: свойства, потенциальная опасность // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы. 2020. Т. 54. № 6. С. 483-507.
3. Плеханов Н.С., Летунова О.В. Освоение космоса: цели, задачи и перспективы // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2018. Т. 3. № 4 (14). С. 719-720.
4. Грунт из материкового района Луны: сборник статей. М.: Наука, 1979. 708 с.
5. Fourth Lunar Science conference. USA. Houston. 1973. 980 p.
6. Berezhnoy A.A. Behavior of volatile elements during impact events on the moon // European Lunar Symposium. Münster. Germany. 2017. P. 45-46.
7. Гавришин А.И. Сравнительный анализ двух методов оценки качества вод // Геоэкология. 2021. № 2. С. 57-66.
8. Wu Y.Z., Wang Z.C., Zhang X.Y. In situ spectra of the moon. European Lunar Symposium. Münster. Germany. 2017. P. 235-236.
9. Головин А.А., Временные рекомендации к геохимическому обеспечению геологосъемочных работ, завершающихся созданием Госгеолкарты – 200. М.: изд-во МПР, 1999. 350 с.
10. Методические рекомендации по геохимической оценке источников загрязнения окружающей среды. М.: изд-во ИМГРЭ, 1982. 66 с.
11. Гавришин А.И. Применение цифровой классификационной технологии при анализе техногенных изменений окружающей среды // Известия высших учебных заведений. Технические науки. 2020. № 1. С. 11-17.
12. Баранов В.М., Катунцев В.П., Баранов В.М., Шпаков А.В., Тарасенков Г.Г. Вызовы космической медицине при освоении человеком Луны: риски, адаптация, здоровье, работоспособность // Ульяновский медико-биологический журнал. 2018. № 3. С. 109-123.
13. Орлов В.П., Фаррахов Е.Г., Вольфсон И.Ф., Алексеев В.М., Прозорова М.В. Современное состояние и перспективы медицинской геологии (к итогам VII конференции международной медико-геологической ассоциации мед-гео) // Разведка и охрана недр. 2018. № 1. С. 3-7.
14. Шопина О.В. Медицинская геохимия ландшафтов. Влияние особенностей элементного состава окружающей среды на здоровье населения // Российский журнал восстановительной медицины. 2019. № 4. С. 47-67.

УДК 55:549.08:622.276.5

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА ЧЕРЕЗ ОБРАЗЦЫ РАСКЛИНИВАЮЩЕГО МАТЕРИАЛА

Песков А.В.

*ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Самара,
e-mail: rednakel@yandex.ru*

Исследовалась фильтрация газа через образцы с расклинивающим материалом, представленным пропантом и кварцевым песком диаметром от 40 до 500 мкм. Установлено, что зависимость получаемых расходов флюида через образец от перепада давлений не является линейной и не выражается, может быть выражена линейным законом Дарси для большинства образцов. Измерения расходов флюида проводились в искусственных образцах, моделирующих трещины гидроразрыва в породах нефтяного пласта. Измерены расходы при различных перепадах давления от 0,1 до 1,74 атм на установке по определению газопроницаемости «Дарсиметр». Исследовались узкие фракции песка и пропанта, которые получены на установке грохот. Использовались два типа искусственных образцов: цилиндрический образец для заполнения насыпным материалом и в виде щели для размещения материала в виде одного слоя заданного размера. В результате исследований устанавливалась степенная связь между расходом флюида и перепадом давления на образце, а также между произведением скорости фильтрации на вязкость флюида и градиентом давления. Основой для искомой связи служила зависимость, полученная для грубозернистого песка при фильтрации воды. В настоящих исследованиях по фильтрации газа установлены степенные зависимости с показателем степени, изменяющимся от 0,93 до 0,3 для образцов с размером зерен расклинивающего материала от 40 до 500 мкм. Выявлено, что с увеличением градиента давления при фильтрации через зерна определенного размера показатель степени снижается. Результаты исследований через цилиндрические образцы и искусственные щели показали сопоставимые и близкие зависимости. Между перепадом давления и расходом для каждой фракции установлены нелинейные степенные зависимости. При перенабивках расклинивающего материала в образце определены погрешности измерения расхода газа: среднеквадратичное отклонение и коэффициент вариации. Рассчитаны числа Рейнольдса для ряда материалов, определяющих отклонение закона фильтрации от линейного закона. Для щели 150 мкм со значительной проницаемостью не получены однозначные зависимости при разных градиентах давления.

Ключевые слова: коэффициент проницаемости, нелинейные зависимости, расклинивающие материалы, пропант, число Рейнольдса, фракции

NONLINEAR DEPENDENCES DURING GAS FILTRATION THROUGH SAMPLES OF WEDGING MATERIAL

Peskov A.V.

Samara State Technical University, Samara, e-mail: rednakel@yandex.ru

Gas filtration through samples with a wedging material, represented by propane and quartz sand with a diameter of 40, was investigated. up to 500 microns. It is established that the dependence of the fluid flow rates obtained through the sample on the pressure drop is not linear and cannot be expressed by Darcy's linear law for most samples. Fluid flow measurements were carried out in artificial samples modeling hydraulic fracturing cracks in oil reservoir rocks. The flow rates were measured at various pressure drops from 0.1 to 1.74 atm at the installation for determining gas permeability "Darsimeter". Narrow fractions of sand and proppant were studied, which were obtained at the screen installation. 2 types of artificial samples were used: a cylindrical sample for filling with bulk material and in the form of a slot for placing the material in the form of a single layer of a given size. As a result of the studies, a power-law relationship was established between the flow rate of the fluid and the pressure drop on the sample, as well as between the product of the filtration rate by the viscosity of the fluid and the pressure gradient. The basis for the desired relationship was the dependence obtained for coarse-grained sand during water filtration. In the present gas filtration studies, power dependences have been established with a degree index varying from 0.93 to 0.3 for samples with a grain size of the wedging material from 40 up to 500 microns. It was revealed that with an increase in the pressure gradient during filtration through grains of a certain size, the degree indicator decreases. The results of studies through cylindrical samples and artificial slits showed comparable and similar dependencies. Nonlinear power dependences are established between the pressure drop and the flow rate for each fraction. During readjustments of the wedging material in the sample, the errors of measuring the gas flow were determined: the standard deviation and the coefficient of variation. The Reynolds numbers are calculated for a number of materials determining the deviation of the filtration law from the linear law. For a gap of 150 microns with significant permeability, no unambiguous dependences were obtained for different pressure gradients.

Keywords: permeability coefficient, nonlinear dependencies, wedging materials, proppant, Reynolds number, fractions

Гидравлический разрыв пласта в настоящее время является одним из самых эффективных методов повышения нефтеотдачи, и при использовании этой операции

рассматривают качество расклинивающего материала для заполнения трещины гидроразрыва, такие как диаметр и способ укладки частиц, их отсортированность, про-

ницаемость трещины с расклинивающим материалом. Перед применением данного метода для прогноза желательно иметь значительное количество нефтепромысловых данных и сопутствующих исследований, чтобы снизить риски недостаточной эффективности проведения метода [1; 2].

Цель исследования – по результатам исследований параметров фильтрации газа на установке «Дарсиметр» через искусственные образцы с расклинивающим материалом, моделирующие трещину гидроразрыва пласта, установить вид нелинейной степенной зависимости между градиентом давления и расходом газа; исследования провести на цилиндрических искусственных образцах, вмещающих пропант или песок с заданным размером зерен, и в искусственных образцах в виде щелей с расклинивающим материалом; рассчитать по образцам искусственных трещин проницаемость.

Материалы и методы исследования

В настоящей статье изучались параметры фильтрации: расход газа, градиент давления и проницаемость на насыпных моделях с расклинивающим материалом: пропантом, кварцевым песком размером зерен от 40 до 500 мкм.

Установка по определению газопроницаемости образцов пород

Исследования провести на установке «Дарсиметр» (рисунок). Определялся вид степенной зависимости между расходом газа и градиентом давления в интервале от 0,1 до 1,6 атм. Изучение нелинейной фильтрации можно проводить по уравнению Форхгеймера или с помощью степенных зависимостей, используя искусственные нейронные сети и множественные регрессионные модели [3–6].



Дарсиметр

Известно, что нелинейный закон фильтрации газа может быть выражен как скорость фильтрации v в зависимости от градиента давления dp / dL [7]:

$$v = k_c \left(\frac{dp}{dL} \right)^n,$$

где n принимает значение в пределах $1 \geq n \geq 0,5$.

Численные значения n и k_c в каждом случае определяются из опытов. В настоящем исследовании уточнялось изменение показателей n и k_c в зависимости от изменения градиента давления. В опытах с грубозернистым песком при фильтрации жидкости была выведена зависимость

$$v = 173 \left(\frac{d}{90} i \right)^n [7],$$

где d – диаметр зерен, а i – гидравлический уклон или градиент давления dp / dL , отличающийся от i на постоянный множитель удельный вес жидкости.

Выявлено, что с увеличением диаметра зерен величина показателя степени уменьшается. В наших исследованиях, при фильтрации газа, предполагалось проверить, справедливо ли будет изменение показателя степени, при изменении диаметра зерен расклинивающего материала. Для расчета проницаемости использовались выражения

$$k = \frac{d^2}{96\sigma}, [7] \quad (1)$$

$$k = b^2 m_T, [2] \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{5(1-m)^2}{4m^3},$$

где b – раскрытость щели,
 m_T – трещинная пористость,
 m – пористость.

Проницаемость в искусственных образцах, наполненных зернами пропанта, зависит от величины угла Θ при различном расположении зерен. Крайние конфигурации соответствуют теснейшему расположению зерен при $\Theta = 60^\circ$ и свободному при $\Theta = 90^\circ$.

Для исследований применялся цилиндрический искусственный образец из оргстекла с внутренним отверстием, заполняемым исследуемым материалом и уплотняемым с торцов. А также использовался искусственный образец щели.

Таблица 1

Степенная зависимость расхода газа от перепада давления
 $Q = F(\Delta p)$, $Q \cdot \mu / s = F(p/l)$, k , Re для зерен разного размера пропанта и песка

Номер	Описание	$Q = F(\Delta p)$	$q\mu/s = f(p/l)$	k	Re
1	Естественный пропант	$2 \cdot x^{-0,697}$	—	—	—
2	Пропант более 500 мкм	$10^{-7} x^{0,53}$			
3	Песок 63 мкм + естественный	$10^{-8} x^{0,66}$			
4	Пропант более 300 мкм	$3 \cdot 10^{-7} x^{0,46}$			
5	Щель 180 мкм с пропантом	$3 \cdot 10^{-8} x^{0,64}$			
6	Щель 180 мкм + щель 75 мкм	$2 \cdot 10^{-7} x^{0,606}$			
7	Щель 100 мкм с пропантом	$3 \cdot 10^{-9} x^{0,77}$			
8	Щель 75 мкм открытая	$10^{-8} x^{0,8}$			
9	Щель 150 мкм открытая	$4 \cdot 10^{-8} x^{0,62}$			
10	150 мкм	$2 \cdot 10^{-8} x^{0,695}$			
11	180 мкм	$2 \cdot 10^{-8} x^{0,65}$			
12	125 мкм	$10^{-8} x^{0,72}$	$5 \cdot 10^{-10} x^{0,72}$	$7,3-13 \cdot 10^{-12}$	7-25
13	106 мкм	$4 \cdot 10^{-9} x^{0,813}$	$10 \cdot 10^{-10} x^{0,813}$	$6-9 \cdot 10^{-12}$	5-20
14	80 мкм	$3 \cdot 10^{-9} x^{0,825}$	$7 \cdot 10^{-11} x^{0,82}$	$3,8-6,5 \cdot 10^{-12}$	4-12
15	63 мкм	$6 \cdot 10^{-10} x^{0,905}$	$10^{-11} x^{0,905}$	$2,8-3,1 \cdot 10^{-12}$	3-8
16	40 мкм	$3 \cdot 10^{-10} x^{0,92}$	$6 \cdot 10^{-12} x^{0,92}$	$1,8-2,1 \cdot 10^{-12}$	0,1-5

Исследуемый образец представлял собой полосу с размещенным на клею веществом пропанта заданной фракции в один слой. Полоска укреплялась в щели вплотную по ее раскрытости, равной диаметру зерен исследуемого материала и толщине подложки. Также исследовался образец пленки с пропантом и с некоторым дополнительным раскрытием. Это был образец пленки с пропантом диаметром 180 мкм и дополнительной раскрытостью 75 мкм. Расклинивающий материал представлял собой пропант марки Боровичи, который был рассеян на фракции от 212 до 300 мкм, более 300 мкм и более 500 мкм. Также использовались смесь 50% естественного образца пропанта и 50% фракции менее 63 мкм, а также кварцевый песок фракций 40, 63, 80, 125, 150, 180 мкм.

Результаты исследования и их обсуждение

Для определения погрешностей исследования проведены измерения расхода газа при давлении 1 атм для 15 перенабивок образца. Математическое ожидание расхода составило $q = 5,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$, среднее квадратичное отклонение $1,21 \cdot 10^{-5}$, коэффициент вариации 0,21.

Рассмотрим полученные результаты (табл. 1). В степенной зависимости $Q = f(p)$

при увеличении диаметра зерен от 40 до 500 мкм значение степени снижается от 0,905 до 0,53, а в свободном множителе или коэффициенте пропорциональности значение степени снижается от -12 до -7. Для зависимостей с малым диаметром 40, 63 мкм графики зависимостей $Q = f(p)$ при $p = 0,1-1,7$ атм аппроксимируются прямыми линиями. Уравнение прямой линии для зерен 40 мкм $y = 2 \cdot 10^{-10} x + 2 \cdot 10^{-6}$. Числа Рейнольдса для этих данных не выше критического значения по Щелкачеву. Для опытов с расклинивающим материалом с $d = 40, 63, 80, 106$ мкм рассчитывались значения коэффициента проницаемости с учетом погрешности из-за отклонения реального закона фильтрации от линейного закона Дарси (табл. 1). Коэффициент пропорциональности K_c отличается от коэффициента проницаемости k приблизительно в 3 раза для образцов с $d = 40, 63$ мкм. И эти параметры отличаются в 10 раз для образцов с $d = 80$ мкм. Таким образом, зависимости для зерен с $d = 40, 63$ мкм близки к линейным. Использование для расчетов закона Дарси в таких случаях является некорректным. При увеличении диаметра зерна материала на пленках в искусственных щелях от 100 до 180 мкм показатель степени при x снижается от 0,77 до 0,64.

Таблица 2

Законы фильтрации через цилиндрические образцы

Размер зерна, мкм	$Q = f(\Delta p)$	Δp	$q\mu/s = p/l$
Более 212 и менее 300	$10^{-7}x^{0,51}$	0,06–1,74	$10^{-8}x^{0,51}$
	$4 \cdot 10^{-7}x^{0,42}$	1,05–1,74	$4 \cdot 10^{-8}x^{0,42}$
	$2 \cdot 10^{-7}x^{0,49}$	0,497–0,93	$2 \cdot 10^{-8}x^{0,49}$
	$6 \cdot 10^{-8}x^{0,6}$	0,13–0,497	$3 \cdot 10^{-9}x^{0,6}$
300	$3 \cdot 10^{-7}x^{0,46}$	0,22–1,76	$2 \cdot 10^{-8}x^{0,47}$
	$7 \cdot 10^{-7}x^{0,395}$	1,11–1,76	$8 \cdot 10^{-8}x^{0,395}$
	$3 \cdot 10^{-7}x^{0,45}$	0,4–0,9	$3 \cdot 10^{-8}x^{0,45}$
	$2 \cdot 10^{-7}x^{0,52}$	0,227–0,6	$10^{-8}x^{0,52}$
более 500	$10^{-7}x^{0,52}$	0,145–1,7	$10^{-0,8}x^{0,52}$
	$2 \cdot 10^{-6}x^{0,307}$	1,09–1,7	$3 \cdot 10^{-7}x^{0,3}$
	$2 \cdot 10^{-7}x^{0,498}$	0,43–0,89	$2 \cdot 10^{-8}x^{0,49}$
	$8 \cdot 10^{-8}x^{0,588}$	0,135–0,320	$4 \cdot 10^{-9}x^{0,58}$
	$6 \cdot 10^{-10}x^{0,905}$	0,08–1,87	$10^{-11}x^{0,905}$
	$2 \cdot 10^{-9}x^{0,8}$	1,7–1,2	$6 \cdot 10^{-11}x^{0,8}$
	$5 \cdot 10^{-10}x^{0,93}$	0,5–1,295	$8 \cdot 10^{-12}x^{0,93}$
	$6 \cdot 10^{-10}x^{0,91}$	0,5–0,08	$1 \cdot 10^{-11}x^{0,91}$
63+бор	$2 \cdot 10^{-8}x^{0,66}$	0,15–1,78	$10 \cdot 10^{-9}x^{0,66}$
	$10^{-7}x^{0,53}$	1,07–1,78	$7 \cdot 10^{-9}x^{0,53}$
	$3 \cdot 10^{-8}x^{0,66}$	1,07–0,5	$10^{-9}x^{0,66}$
бор	$3 \cdot 10^{-8}x^{0,696}$	0,16–1,78	$10^{-9}x^{0,695}$
	$2 \cdot 10^{-9}x^{0,697}$	1–1,6	$10^{-9}x^{0,698}$
	$6 \cdot 10^{-9}x^{0,82}$	0,5–1	$2 \cdot 10x^{0,82}$

Рассмотрим полученные законы фильтрации через цилиндрические образцы с расклинивающим материалом разного диаметра зерен при трех режимах перепада давления (табл. 2). 1 режим приближенно от 1 до 1,7 атм, 2 режим приближенно от 0,5 до 1 атм, 3 режим от 0,1 до 0,5 атм (табл. 2). В таблице показаны степенные зависимости $Q = f(p)$ и $Q\mu/s = F(p/l)$.

При снижении перепада давления для зерен фракций от 212 до 300 мкм, более 300 мкм и более 500 мкм показатель степени при x возрастает. Меньший показатель степени при x для зерен с самым большим диаметром $d = 500$ мкм при перепаде давления 1–1,7 атм составил 0,307. Для диаметра зерен с d фракция от 212 до 300 мкм показатель степени при x для диапазона $\Delta p = 1–1,7$ атм составил 0,42, для диапазона $\Delta p = 0,5–1$ атм показатель степени – 0,49 для диапазона $\Delta p = 0,1–0,5$ атм показатель степени – 0,6. Зависимости, полученные по общему перепаду давления от 0,1 до 1,7 атм, отличаются от зависимостей, полученных

при более узких перепадах: 0,1–0,5; 0,5–1; 1–1,7 атм – и являются менее точными.

Таблица 3

Законы фильтрации через образцы искусственных щелей

Щель, мкм	степень	Δp , атм
100 с пропантом	$3 \cdot 10^{-9}x^{0,77}$	0,09–1,57
180 с пропантом	$3 \cdot 10^{-8}x^{0,64}$	0,11–1,57
150 мкм открытая	$7 \cdot 10^{-10}x^{0,87}$	0,065–0,175
150 мкм открытая	$2 \cdot 10^{-11}x^{1,14}$	0,175–0,3
75 мкм открытая	$3 \cdot 10^{-10}x^{0,81}$	0,105–1,04
75 мкм открытая	$6 \cdot 10^{-10}x^{0,77}$	0,392–1,04
75 мкм открытая	$10^{-10}x^{0,87}$	0,105–0,392
180 с пропантом + 75	$2 \cdot 10^{-7}x^{0,606}$	0,07–1,3

Рассмотрим полученные законы фильтрации через образцы искусственных щелей с расклинивающим материалом разного диаметра зерен и без расклинивающего материала (табл. 3).

Рассчитанная проницаемость по искусственным щелям

Щель, раскрытость, мкм	К изм, Д	p	К (1), Д, m = 0,45%	К (2), Д
75	522–753	1,04–0,14		466
150	1850–2148	1,57–0,3		1867
100	48–86	1,57–0,09	24	
180	67–141	1,57–0,18	77	
180 + 75	167–505	1,3–0,07	77	466

При увеличении диаметра зерна от 100 до 180 мкм на материале пленок в искусственных щелях показатель степени при x снижается от 0,77 до 0,64, а степень при свободном сомножителе изменяется от -8 до -7. Для открытой щели 75 мкм при диапазоне давления $p = 1,04-0,105$ атм зависимость $q = f(p)$ составила $3 \cdot 10^{-10} x^{0,81}$, однако для диапазона 0,392–1,04 атм зависимость имеет вид $6 \cdot 10^{-10} x^{0,77}$. Эти изменения вида зависимости при изменении диапазона давления подобны цилиндрическим образцам. Щель 75+180 состоит из пленки с зернами 180 мкм и параллельного пространства из щели с раскрытостью 75 мкм. По обеим частям этой композитной щели идут два потока газа пропорционально их проницаемостям, и суммарный поток рассчитывается по средней проницаемости щели. Вид зависимости для этой щели $2 \cdot 10^{-7} x^{0,606}$. Вид зависимости подобен для щели с расклинивающим материалом 180 мкм, чем для открытой щели 75 мкм. И имеет вид $3 \cdot 10^{-8} x^{0,64}$. Щель 150 мкм исследовалась при диапазоне давления 0,065–0,3 атм. Разделив общий интервал на 2 подынтервала 0,065–0,175 атм и 0,175–0,3 атм, нашли две зависимости, значительно отличающиеся по показателю степени при перепаде давления $-7 \cdot 10^{-10} x^{0,87}$ и $2 \cdot 10^{-11} x^{1,14}$. Это связано, вероятно, со значительной раскрытостью щели и с проявлением нелинейной фильтрации газа. Для цилиндрического образца и щели для зерен 180 мкм получены практически идентичные законы фильтрации, и 100 мкм показало практически идентичные фильтрации законы: $2 \cdot 10^{-8} x^{0,65}$ для цилиндрического образца и $3 \cdot 10^{-8} x^{0,64}$ для искусственной щели. Несколько различимы законы для образцов с зернами $d = 100$ мкм. Это связано с различной упаковкой зерен при укладке в образцы – от возможных крайних конфигураций, соответствующих теснейшему расположению зерен при $\Theta = 60^\circ$ и свободному при $\Theta = 90^\circ$.

Проницаемость для щели 180 мкм составила 77Д и для щели 100 мкм 24Д (табл. 4). Для щели 75 мкм проницаемость по формуле (2) составила 466 Д а для щели 150 мкм – 1867 Д. Для щели из двух компонентов 180 + 75 расчет производился по известной зависимости для нахождения средней проницаемости пласта, состоящего из двух пропластков разной проницаемости и мощности, и в результате суммарная проницаемость оказалась 216 Д. Между показателем степени зависимости и диаметром зерен расклинивающего материала от 40 до 500 мкм получена связь $n = 5,67d^{0,45}$ при величине достоверности аппроксимации $R2 = 0,89$.

Заключение

На искусственных образцах, моделирующих трещину гидроразрыва с расклинивающим материалом пропанта Боровичи со средним диаметром зерен от 250–600 мкм, и фракциях кварцевого песка с диаметром от 40 до 180 мкм установлены степенные зависимости расхода газа от перепада давления и зависимости скорости фильтрации от градиента давления. Установленные зависимости

$$v = k_c \left(\frac{dp}{dL} \right)^n$$

имеют показатель степени $n = 0,92-0,31$, снижающийся при увеличении диаметра зерен от 40 до 600 мкм. В пределах каждого диапазона перепада давлений от 0,1 до 1,7 атм для опыта с выбранной фракцией показатель степени n снижается на участке повышенных перепадов давлений от 1 до 1,7 атм. Коэффициент пропорциональности K_c для фракций пропанта изменяется от $4 \cdot 10^{-9}$ до $3 \cdot 10^{-7}$. Коэффициент пропорциональности при диаметре зерен 40 мкм при фильтрации газа по закону близкому к линейному принимает значение $6 \cdot 10^{-12} x^{0,92}$ и больше коэффициента прони-

цаемости вычисленного по закону Дарси приблизительно в 3 раза. Полученные результаты исследований возможно использовать для оценки качества расклинивающего материала в трещине гидроразрыва пласта.

Список литературы

1. Петров В.А., Липаев А.А. Проблемы, возникающие при проведении ГРП и возможности их решения // Управление техносферой 2022. Т. 5. Вып. 1. URL: <https://technosphere-ing.ru/files/2021/1702.pdf> (дата обращения: 11.11.2022).
2. Бобков Д.О. Проблемы, возникающие при проведении ГРП, и возможности их решения // Современные научные исследования и инновации. 2017. № 7. URL: <https://web.shauka.ru/issues/2017/07/84111> (дата обращения: 06.05.2021).
3. Песков А.В. Особенности измерения абсолютной проницаемости горных пород // Вестник Самарского государственного технического университета. 2020. Т. 28. № 2 (66). С. 73–83.
4. Золотухин А.Б., Гаюбов А.Т. Использование множественной регрессионной модели для описания течения флюида в пористых средах // Нефть. Газ. Новации. 2019. № 12. С. 64–70.
5. Зайцев М.В., Михайлов Н.Н., Туманова Е.С. Модели нелинейной фильтрации и влияние параметров нелинейности на дебит скважин в низкопроницаемых коллекторах // Георесурсы. 2021. Т. 23. № 4. С. 44–50.
6. Песков А.В. Проницаемость расклинивающего материала // Успехи современного естествознания. 2022. № 3. С. 86–91.
7. Щелкачев В.Н., Лапук Б.Б. Подземная гидравлика. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 736 с.

СТАТЬИ

УДК 536.21:625.87

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ДОРОЖНОГО ПОЛОТНА**Галкин А.Ф., Железняк М.Н., Жирков А.Ф.***Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, e-mail: afgalkin@yandex.ru*

Одним из важных показателей, используемых в тепловых расчетах при проектировании автомобильных дорог в криолитозоне, является температура внешней поверхности дорожной одежды или, при отсутствии таковой, поверхности дорожного полотна. В работе исследовано влияние температурных условий эксплуатации и теплофизических свойств грунтов дорожного основания на изменение температуры поверхности дорожного полотна. Рассмотрены условия эксплуатации автомобильных дорог в зимний и летний периоды года. Приведены расчетные зависимости для определения безразмерной и размерной температуры поверхности дороги. Выполнен комплексный качественный и количественный анализ влияния температурных условий эксплуатации и теплофизических свойств грунтов основания на изменение безразмерной температуры поверхности дороги. Установлены основные качественные и количественные характеристики влияния температурного фактора, коэффициента теплоусвоения грунта и скорости ветра на безразмерную температуру поверхности дороги. В частности, показано, что коэффициент теплоусвоения грунта дорожного основания сильнее влияет на температуру поверхности дороги в зимний период. При этом зависимость безразмерной температуры от коэффициента теплоусвоения снижается с течением времени как для летнего, так и зимнего периода приблизительно в одинаковом темпе. Результаты численных расчетов представлены в виде 2D- и 3D-графиков, которые позволяют наглядно оценить влияние исходных климатических и теплофизических параметров на диапазон изменения безразмерной температуры поверхности дорожного полотна в различные периоды года.

Ключевые слова: автомобильная дорога, криолитозона, климат, скорость ветра, температура поверхности, температура воздуха, коэффициент теплоусвоения

CALCULATION OF THE SURFACE TEMPERATURE OF THE ROADWAY**Galkin A.F., Zheleznyak M.N., Zhirkov A.F.***P.I. Melnikov Institute of Permafrost Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, e-mail: afgalkin@yandex.ru*

The purpose of the work was to study the influence of temperature conditions of road operation conditions and thermophysical properties of the soils of the road base on the change in the dimensionless temperature of the roadway surface. The operating conditions of roads in the winter and summer period of the year are considered. Calculated dependencies for determining the dimensionless and dimensional temperature of the road surface are given. A comprehensive qualitative and quantitative analysis of the influence of temperature conditions of road operating conditions and thermophysical properties of road base soils on changes in the dimensionless temperature of the roadway surface is carried out. The main qualitative and quantitative characteristics of the influence of the temperature factor, the coefficient of heat absorption of the soil and the wind speed on the dimensionless temperature of the road surface have been established. In particular, it is shown that the coefficient of thermal assimilation of the soil of the road base has a stronger effect on the temperature of the road surface in winter. At the same time, the dependence of the dimensionless temperature on the heat absorption coefficient decreases over time, both for the summer and winter periods at approximately the same pace. The results of numerical calculations are presented in the form of 2D and 3D graphs, which make it possible to visually assess the influence of the initial climatic and thermophysical parameters on the range of changes in the dimensionless temperature of the roadway surface in the summer and winter periods of the year.

Keywords: highway, permafrost, climate, wind speed, surface temperature, air temperature, heat absorption coefficient, soil

Температурный режим дорожного полотна и основания во многих случаях является определяющим фактором безопасной и надежной эксплуатации автомобильных дорог в районах распространения многолетней и островной мерзлоты [1-3]. Особенно, как отмечают многие исследователи [4-6], важно учитывать тепловой фактор при наличии в зоне теплового влияния дороги льдогрунтовых и ледяных тел различного генезиса [7-9]. Существенная зависимость прочностных свойств льда, льдогрунтов и дисперсных пород от температуры (даже в диапазоне отрицательных значений) [10-12] значительно осложняет как выбор пра-

вильных технических решений при проектировании, так и обеспечение заданного уровня надежности и безопасности при эксплуатации дорог в криолитозоне. На формирование температурного режима объектов антропогенного воздействия человека на окружающую среду (к которым можно отнести и объекты транспортного сообщения – железные и автомобильные дороги) оказывают влияние различные факторы, такие как теплофизические свойства грунтов, наличие ледяных включений в зоне теплового влияния, скорость и температура воздуха на конкретном участке дороги, вид покрытия и конструкция дорожной одеж-

ды и т.д. [13-15]. Каждый фактор в той или иной степени определяет уровень негативного влияния антропогенного воздействия на окружающую среду [16-18]. Поэтому важно уже на стадии проектирования определить степень ожидаемого теплового воздействия на грунтовое основание и зону теплового влияния проектируемой или реконструируемой автомобильной дороги [19-21]. Одним из важных показателей, используемых в тепловых расчетах при проектировании автомобильных дорог в криолитозоне, является температура внешней поверхности дорожной одежды или, при отсутствии таковой, поверхности дорожного полотна [22].

Целью настоящей работы являлось исследование влияния климатических условий (температуры и скорости воздуха), а также теплофизических свойств грунтов дорожного основания на изменение температуры поверхности дорожного полотна.

Материалы и методы исследования

Опираясь на зависимость, приведенную в работе [22], расчетную формулу для определения безразмерной температуры поверхности дороги запишем в следующем виде:

$$Q = (T - T_e) / (t - T_e), \quad (1)$$

где Q – безразмерная температура поверхности дорожного полотна; T – температура поверхности дорожного полотна, °С; T_e – температура на глубине зоны теплового влияния поверхности дороги, °С; t – температура воздуха, °С.

С другой стороны, используя известное решение одномерного уравнения теплопроводности Фурье при граничных условиях третьего рода, можно записать [23; 24]:

$$Q = 1 / (1 + D / \alpha \sqrt{3\tau}), \quad (2)$$

$$D = \sqrt{(\rho c \lambda)}, \quad (3)$$

где D – коэффициент теплоусвоения грунта дорожного основания, Дж/м²Кс^{0,5}; α – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/м²К; τ – время, с; ρ – плотность грунта, кг/м³; c – удельная теплоемкость грунта, Дж/кг×К; λ – теплопроводность грунта, Вт/м×К.

Коэффициент конвективного теплообмена между воздухом и поверхностью дороги может быть найден по формуле [25; 26]:

$$\alpha = 6,16 + 4,19V, \quad 0 \leq V \leq 5, \quad (4)$$

где α – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/м²К; V – средняя скорость ветра на рассматриваемом участке дороги, м/с.

Собственно размерное значение температуры поверхности дорожного полотна, выраженное в градусах Цельсия, может быть определено по простой формуле, вытекающей из выражения (1):

$$T = T_e + (t - T_e)Q. \quad (5)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ формул (1), (2) и (3) показывает, что температура поверхности дороги в различные сезоны года зависит от теплофизических свойств подстилающего грунта в летний и зимний периоды: чем больше отличие свойств грунтов в талом и мерзлом состоянии, тем больше разница температурой поверхности дорожного полотна и температурой атмосферного воздуха. При этом зависимость температуры поверхности от коэффициента конвективной теплоотдачи (скорости ветра) и времени обратная: чем больше их значения, тем разница между температурами воздуха и поверхности дороги меньше. В работе [26] показано, что при увеличении значения коэффициента конвективного теплообмена (средней скорости ветра на рассматриваемом участке трассы) температура поверхности дороги будет близка к температуре атмосферного воздуха.

Для достижения цели были проведены варианты расчеты, результаты которых представлены в виде графиков на рисунках 1-3. При проведении расчетов были использованы исходные данные, характерные для различных климатических условий эксплуатации автомобильных дорог в криолитозоне: температура горных пород на глубине зоны теплового влияния в диапазоне от -1,0 до -7,0 °С; среднелетняя температура атмосферного воздуха в диапазоне от +8,0 до +12,0 °С; среднезимняя температура в диапазоне от -15,0 до -25,0 °С. Коэффициент теплоусвоения грунта был принят переменным, изменяющимся в диапазоне от 1200 до 1500 Дж/м²Кс^{0,5} в летний период года. И в интервале от 1500 до 1800 Дж/м²Кс^{0,5} в зимний период года. Коэффициент теплоотдачи для летнего периода принимался равным 15,0 Вт/м²К, а для зимнего 12,0 Вт/м²К.

На рис. 1 представлены 3D-графики изменения безразмерной температуры дорожного полотна в летний (А) и зимний (Б) периоды года в зависимости от температуры грунта и средней температуры воздуха на рассматриваемом участке трассы.

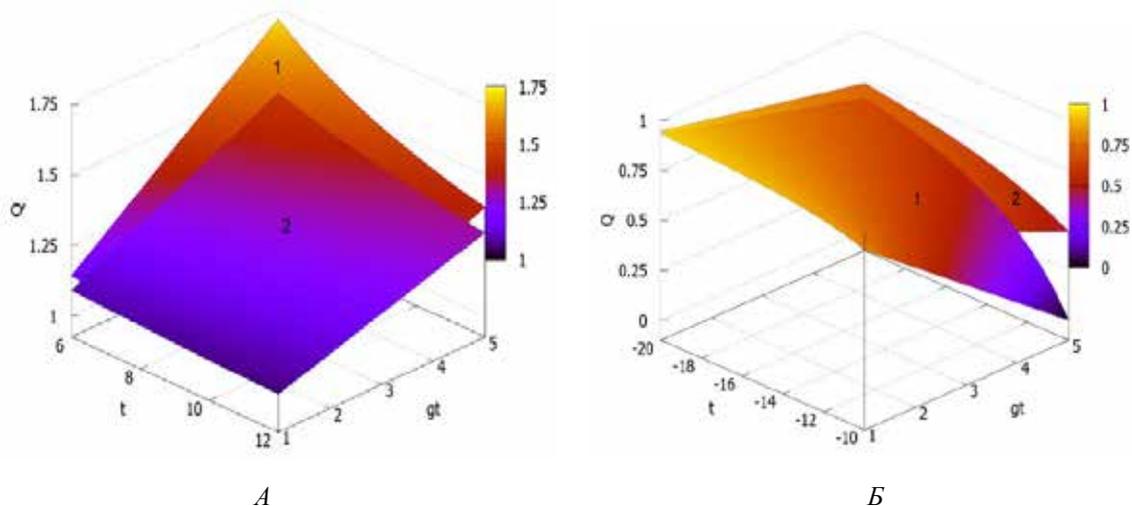


Рис. 1. Изменение безразмерной температуры поверхности дороги в зависимости от средних значений температур воздуха и средних отклонений температуры воздуха и поверхности дороги при различной естественной температуре пород: 1 – $-1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $-5,0\text{ }^{\circ}\text{C}$; А) в теплый (летний) период года; Б) в холодный (зимний) период года

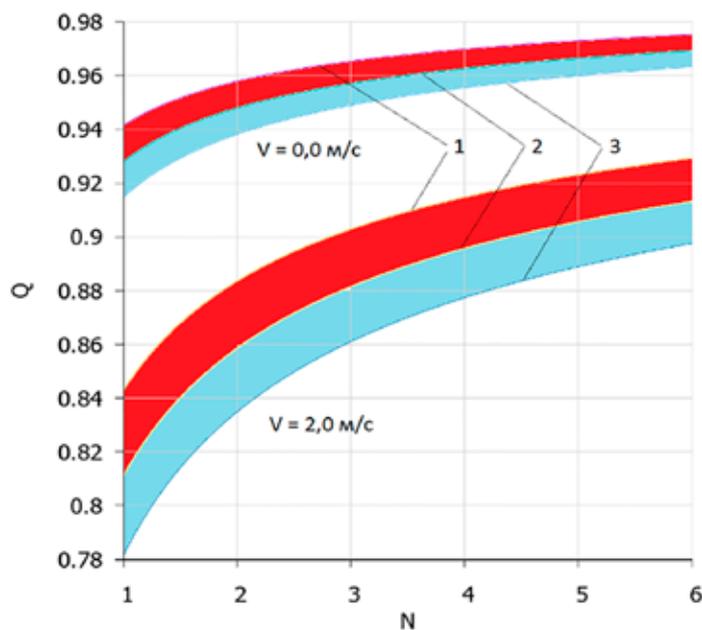


Рис. 2. Изменение параметра Q в зависимости от показателя теплоусвоения грунта « D » ($\text{Дж}/\text{м}^2\text{Кс}^{0.5}$) при различной длительности рассматриваемого периода « N » (месяцы): 1 – $D = 1200$; 2 – 1500 ; 3 – 1800

Из графиков видно, что безразмерная температура существенно зависит от разности температур поверхности дороги и воздуха как в летний, так и в зимний периоды года. Причем в оба периода при увеличении разности температур между атмосферным воздухом и поверхностью дорожного полотна значение безразмерной температуры уменьшается. Сравнение характера плоско-

стей, например № 1 и № 2 на рисунке 1, подтверждает этот вывод.

На рис. 2 представлены графики изменения значений безразмерной температуры поверхности дороги на рассматриваемом участке трассы в различные периоды года в зависимости от коэффициента теплоусвоения грунтов дорожного основания.

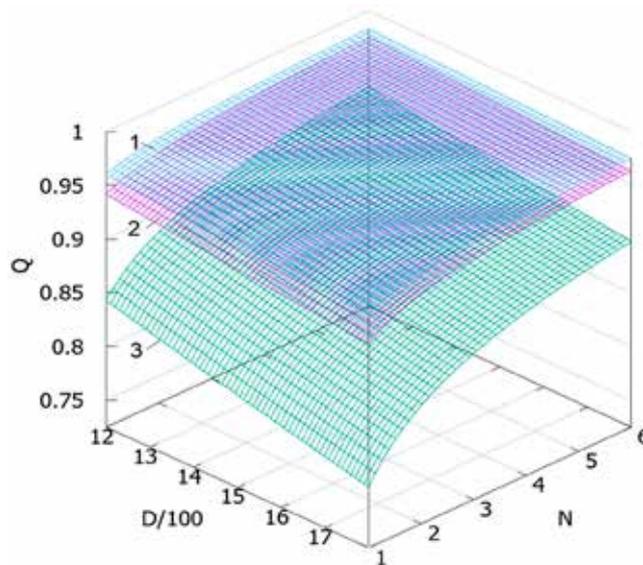


Рис. 3. Изменение параметра Q в зависимости от показателя теплоусвоения грунта и длительности рассматриваемого периода N (месяцы) для различных средних скоростей ветра: 1 – 2,0 м/с; 2 – 1,5 м/с; 3 – 0,0 м/с

Анализ графиков на рисунке 2 позволяет сделать следующие выводы. Коэффициент теплоусвоения грунта сильнее влияет на температуру поверхности грунта в зимний период, чем в летний. При этом зависимость безразмерной температуры от коэффициента теплоусвоения снижается с течением времени как для летнего, так и зимнего периода приблизительно в одинаковом темпе. Средняя скорость ветра на конкретном участке трассы также оказывает существенное влияние на значение безразмерной температуры поверхности дороги как в зимний, так и в летний периоды года, что необходимо учитывать в тепловых расчетах при обосновании проектных решений строительства автомобильных дорог в криолитозоне. Причем это влияние остается не постоянным и снижается с увеличением длительности рассматриваемого временного периода.

Так, например, изменение средней скорости ветра с 0,0 до 2,0 м/с при длительности рассматриваемого периода в 1 месяц (для коэффициента теплоусвоения грунта «D» 1800,0 Дж/м²Кс^{0.5}) приводит к уменьшению безразмерной температуры в 1,17 раза. А при длительности рассматриваемого периода в 5 месяцев – в 1,08 раза. С уменьшением коэффициента теплоусвоения грунта в 1,5 раза (с 1800 до 1200), т.е. при переходе от зимнего к летнему периоду года, степень уменьшения составляет 1,12 и 1,05 соот-

ветственно. То есть с течением времени влияние скорости ветра на значение безразмерной температуры как в летний, так и в зимний периоды снижается. Но темп изменения данного параметра в зимний период почти в 1,3 раза выше. Это свидетельствует о более сильном влиянии скорости ветра на значение безразмерной температуры в зимний период, чем в летний.

На рисунке 3 представлены обобщающие 3D-графики изменения безразмерной температуры поверхности дорожного полотна в зависимости от показателя теплоусвоения грунта и длительности рассматриваемого периода N (месяцы) для различных средних скоростей ветра.

Графики наглядно подтверждают сделанные ранее выводы о степени влияния теплофизических свойств грунтов дорожного основания и климатических параметров в зоне эксплуатации автомобильной дороги на температуру поверхности дорожного полотна. Графики также указывают на правомерность использования средней температуры ветра на рассматриваемых участках при проведении тепловых расчетов. Об этом свидетельствует сравнительный характер плоскостей 1 и 2 на рисунке: изменение скорости ветра в 1,3 раза (с 1,5 до 2,0 м/с) не приводит к изменению безразмерной температуры более чем на 3-7%. То есть ошибка вычисления укладывается в допустимый в инженерной практике диапазон ($\leq 10,0\%$).

Заключение

Выполнен комплексный качественный и количественный анализ влияния температурных условий эксплуатации автомобильных дорог и теплофизических свойств грунтов дорожного основания на изменение безразмерной температуры поверхности дорожного полотна. В частности, показано, что значение безразмерной температуры поверхности дороги существенно зависит от разности температур поверхности дороги и атмосферного воздуха как в летний, так и в зимний периоды года. Причем, независимо от периода года, при увеличении разности температур между атмосферным воздухом и поверхностью дорожного полотна значение безразмерной температуры уменьшается. Коэффициент теплоусвоения грунта дорожного основания сильнее влияет на температуру поверхности дороги в зимний период, чем в летний. При этом зависимость безразмерной температуры от коэффициента теплоусвоения снижается с течением времени как для летнего, так и зимнего периода приблизительно в одинаковом темпе. С увеличением длительности временного периода влияние скорости ветра на значение безразмерной температуры (как в летний, так и в зимний сезоны года) снижается. Но темп изменения данного параметра в зимний период почти в 1,3 раза выше. Это свидетельствует о более сильном влиянии скорости ветра на значение безразмерной температуры в зимний период, чем в летний.

Результаты численных расчетов представлены в виде 2D- и 3D-графиков, которые позволяют наглядно оценить влияние исходных климатических и теплофизических параметров на диапазон изменения безразмерной температуры поверхности дорожного полотна в летний и зимний периоды года.

Статья имеет прежде всего методическое значение и позволяет на конкретном примере детально проследить пути качественного и количественного анализа влияния исходных параметров на конечный результат при проведении инженерных расчетов. Статья может быть полезна как научным работникам в области инженерной геокриологии, так и инженерам-проектировщикам дорожной отрасли. Статья может представлять методический и научный интерес для аспирантов, а также для студентов, обучающихся по специальности 08.02.05 «Строительство и эксплуатация автомобильных дорог и аэродромов». Дальнейшие исследования

должны быть направлены на оценку изменения температуры поверхности дорожного полотна в переходные периоды года: периоды оттаивания или промерзания грунтов дорожного основания.

Список литературы

1. Шац М.М. Современное состояние городской инфраструктуры г. Якутска и пути повышения ее надежности // Геориск. 2011. № 2. С. 40–46.
2. Сериков С.И., Шац М.М. Морозобойное растрескивание грунтов и его роль в состоянии поверхности и инфраструктуры г. Якутска // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2018. № 1. С. 56–69. DOI: 10.15593/2409-5125/2018.01.04.
3. Шестернев Д.М., Литовко А.В. Комплексные исследования по выявлению деформаций на автомобильной дороге «Амур» // Материалы докладов XIV Общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». М.: Геомаркет, 2018. С. 309-314.
4. Железняк М.Н., Шестернев Д.М., Литовко А.В. Проблемы устойчивости автомобильных дорог в криолитозоне // Материалы докладов XIV Общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» М.: Геомаркет, 2018. С. 223-227.
5. Кондратьев В.Г., Кондратьев С.В. Как защитить федеральную автодорогу «Амур» Чита – Хабаровск от опасных инженерно-геокриологических процессов и явлений // Инженерная геология. 2013. № 5. С. 40-47.
6. Станиловская Ю.В., Мерзляков В.П., Сергеев Д.О., Хименков А.Н. Оценка опасности полигонально-жильных льдов для линейных сооружений // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2014. № 4. С. 367–378.
7. Галкин А.Ф. Программа исследований теплового режима грунтов при наличии крупных ледяных включений в породах гелиотермозоны // Энергобезопасность и энергосбережение. 2021. № 1. С.40-44. DOI 10.18635/2071-2219-2021-1-40-44.
8. Галкин А.Ф., Панков В.Ю. Влияние льдистости грунта на глубину оттаивания дорожного основания // Арктика и Антарктика. 2022. № 2. С. 13-19. DOI: 10.7256/2453-8922.2022.2.38103.
9. Шапран В.В., Фазилова З.Т. Факторы, оказывающие влияние на развитие продольных профильных деформаций земляного полотна в криолитозоне // Мир транспорта. 2020. Т. 18. № 2. С. 82–101.
10. Вотяков И.Н. Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов Якутии. Новосибирск: Наука, 1975. 176 с.
11. Teng J., Shan F., He Z., Zhang S., Sheng D. Experimental study of ice accumulation in unsaturated clean sand. Géotechnique. 2018. DOI: 10.1680/jgeot.17.P.208
12. Guofang Xu, Jilin Qi, Wei Wu. Temperature Effect on the Compressive Strength of Frozen Soils: A Review. Recent Advances in Geotechnical Research. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. 2019. P. 227-236.
13. Гречищев С.Е. Чистотинов Л.В., Шур Ю.Л. Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз. М.: Недра, 1980. 383 с.
14. Шур Ю.Л. Верхний горизонт толщи мерзлых пород и термокарст. Новосибирск: Наука, 1988. 213 с.
15. Варламов С.П., Жирков А.Ф., Находкин Д.А. Температурный режим почвогрунтов при нарушении покровов в современных климатических условиях Центральной Якутии // Наука и образование. 2017. № 4 (88). С. 65-71.
16. Жирков А.Ф., Варламов С.П., Железняк М.Н. Результаты годичного цикла наблюдений температурного режима грунтов в естественных условиях и при нарушении

покровов // *Материалы пятой конференции геокриологов России*. 2016. Часть 5-7. С. 52-58.

17. Калиничева С.В., Федоров А.Н. Прогноз изменения температуры мерзлотных ландшафтов при удалении напочвенного покрова // *География и краеведение в Якутии и сопредельных территориях Сибири и Дальнего Востока*. Якутск, 2022. С. 40-44.

18. Galkin A.F., Pankov V.Yu. Thermal Protection of Roads in The Permafrost Zone. *Journal of Applied Engineering Science*. 2022. Vol. 20. № 2. P. 395-399. DOI: 10.5937/jaes0-34379.

19. Бессонов И.В., Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Говряков И.С., Горбунова Э.А. Анализ конструктивных решений в зависимости от типа изоляционных материалов в дорожных покрытиях в многолетнемерзлых грунтах // *Транспортное строительство*. 2022. № 1. С. 14-17. DOI: 10.18635/2071-2219-2020-4-24-28.

20. Galkin A.F. Controlling The Thermal Regime of the Road Surface in the Cryolithic Zone. *Transportation Research Procedia*. 2022. Vol. 63. P. 1224-1228. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.128.

21. Давыдов В.А., Бондарева Э.Д. Изыскания и проектирование автомобильных дорог на многолетнемерзлых грунтах. Омск: ОГПИ, 1989. 183 с.

22. Панков В.Ю., Фёдоров Я.В. Безразмерная температура поверхности дорожной одежды // *Тенденции развития науки и образования*. 2022. № 89(1). С. 51-64. DOI: 10.18411/tmio-09-2022-16.

23. Гудмен Т.Р. Применение интегральных методов в нелинейных задачах нестационарного теплообмена // *Проблемы теплообмена*. М.: Атомиздат, 1967. С. 41-95.

24. Galkin A.F. Calculation of parameters of cryolithic zone mine openings thermal protection coating. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. № 8. P. 64-69.

25. Перлыштейн Г.З. Водно-тепловая мелиорация мерзлых пород на Северо-Востоке СССР. Новосибирск: Наука, 1979. 304 с.

26. Панков В.Ю., Бурнашева С.Г. Влияние скорости ветра на температуру поверхности дорожного полотна // *Тенденции развития науки и образования*. 2020. № 8. С. 116-121. DOI: 10.18411/lj-08-2020-63.

УДК 622.7 (001)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ ГЕОМАТЕРИАЛОВ В ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ КОНУСНОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Осипов Д.А., Филиппов В.Е.

*ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук» Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского
Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, e-mail: Brelick@list.ru*

Представлены результаты экспериментальных исследований по детализации трансформации форм ковких частиц в процессе помола на принципиально новой лабораторной модели конусной мельницы ударного действия для измельчения золотосодержащих руд с дополнительной функцией изометризации частиц золота. В качестве имитаторов золота использовались свинцовые маркеры разной конфигурации. Особенность разработанной конструкции мельницы заключается в том, что рабочая камера мельницы по ходу измельчения состоит из двух последовательных зон. В первой, нисходящей удлиненной зоне, образованной конусообразным ротором и внутренней поверхностью корпуса мельницы, создаются условия для интенсивных динамических контактов частиц руды с рабочими органами и друг с другом. Во второй, нижней зоне – зоне свободной дезинтеграции частиц друг с другом и с активационным плечом – интенсивная деформация ковких частиц компонентов руды (золота) происходит потоком мелкообломочного материала и перекачиванием их вдоль поверхности в нижней части внешнего ротора. В результате экспериментальных исследований по измельчению рудного материала крупностью фракции 5 мм с имитаторами свободного золота в виде частиц свинца на лабораторной модели конусной мельницы установлено, что высокая степень измельчения и изометризации ковких частиц достигается при максимальной загрузке рабочей зоны измельчаемым материалом (30 кг/ч). Мелкие частицы золота при попадании в нижнюю зону мельницы начинают набирать толщину по краям и стремятся к форме сфероида. Установлено, что изометризации (комкованию) подвергаются все частицы свинца и золота в диапазоне крупности 0,5–3 мм. Обработанные частицы свинцовых маркеров в мельнице имеют высокую степень извлечения, поскольку основным технологическим свойством золота при извлечении гравитационным способом является гидравлическая крупность.

Ключевые слова: центробежная мельница, измельчение, раскрытие, золото, центробежная мельница, свинцовые маркеры, степень измельчения, сухое обогащение, дробление

CENTRIFUGAL DOUBLE STAGE CONE MILL

Osipov D.A., Filippov V.E.

*Federal Research Center «Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences» Institute of Mining of the North. N.V. Chersky
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, e-mail: Brelick@list.ru*

The results of experimental studies on the detailing of the transformation of forms of malleable particles during grinding on a fundamentally new laboratory model of a cone impact mill for grinding gold-bearing ores with an additional function of isometrization of gold particles are presented. Lead markers of various configurations were used as gold imitators. The peculiarity of the developed design of the mill is that the working chamber of the mill in the course of grinding consists of two successive zones, where in the first descending elongated zone formed by a cone-shaped rotor and the inner surface of the mill body, conditions are created for intensive dynamic contacts of ore particles with working bodies and with each other. friend. In the second, lower zone, there is a zone of free disintegration of particles with each other and with an activation shoulder, where the malleable particles of the ore (gold) components are intensively deformed by the flow of fine-grained material and rolling along the surface in the lower part of the outer rotor. As a result of experimental studies on the grinding of ore material with a fraction size of -5 mm with simulants of free gold in the form of lead particles on a laboratory model of a cone mill, it was found that a high degree of grinding and isometrization of malleable particles is achieved at a maximum load of the working zone with crushed material (30 kg/h). Fine gold particles, when they enter the lower zone of the mill, begin to gain thickness at the edges and tend to the shape of a spheroid. It has been established that all particles of lead and gold in the size range (0.5–3 mm) are subjected to isometrization (lumping). The processed particles of lead markers in the mill have a high degree of recovery, because. The main technological property of gold during their extraction by the gravitational method is the hydraulic fineness.

Keywords: centrifugal mill, grinding, opening, gold, centrifugal mill, lead markers, grinding degree, dry concentration, crushing

Процессы дезинтеграции руд в мельницах различного типа как наиболее затратные в обогащении золотосодержащих руд всегда требовали новых подходов и решений. Одной из основных проблем сухого обогащения золотосодержащих руд на модульных комплексах является измельчение руд [1, 2],

где у мельниц очень низкий КПД, не более 1–2%. Эффективность модульных комплексов сухого обогащения золотосодержащих руд во многом зависит от совершенствования технологии подготовки сырья, в частности измельчительных установок. Чтобы повысить эффективность дезинтеграции руд

в мельницах, совершенствуются все элементы установок (привод, система смазки, электродвигатели, размер мелющих тел, наполненность барабана, скорость вращения), так как сокращение расходов даже на доли процента дает внушительный экономический эффект [3]. При подготовке сырья для последующего извлечения золота необходимо учитывать технико-экономические показатели измельчительных машин, но также одним из основных факторов эффективности измельчения является сохранность полезного компонента с учетом характера воздействия рабочих элементов аппаратов определенного типа на полезные компоненты руды. Данное явление играет значимую роль в дальнейшем технологическом процессе обогащения.

В лаборатории ОПИ ИГДС СО РАН разработана центробежная двухступенчатая мельница с возможностью обеспечить сохранность свободных и раскрытых частиц ковких материалов [4].

Цель исследования – разработать конструкцию конусной мельницы с дополнительной функцией изометризации частиц золота для последующего сухого обогащения. На основе экспериментальных исследований показать поведение частиц измельчаемого материала в процессе их деэнтратации в конусной мельнице.

Материал и методы исследования

На основе результатов проведенных ранее исследований особенностей разру-

шения частиц золота в процессе измельчения в центробежных и шаровых мельницах [5] была разработана конусная мельница с двухзональной рабочей камерой. Первая (верхняя) часть рабочей полости мельницы состоит из двух противоположно вращающихся рабочих органов конусообразной формы, где в полости межконусного пространства образуется рабочая зона измельчения частиц. Рабочие органы имеют конусную форму с большим углом наклона: внешний конус выполнен с углом наклона 85° , а внутренний конус – с углом наклона 80° . Вторая (нижняя) часть мельницы является зоной разрушения и изометризации ковких частиц, где реализуется интенсивное окомкование полезных компонентов руды (золота).

Центробежная конусная мельница (рис. 1) состоит из герметичного разборного корпуса с верхним загрузочным и нижним разгрузочным отверстиями. Внутри корпуса установлены внешний и внутренний рабочие органы в виде вращающихся роторов с ребрами, расположенными вдоль рабочего органа по всей длине. На верхнем основании внутреннего рабочего органа расположены разгонные радиальные ребрышки. Нижняя часть рабочей камеры имеет вид ступенчатой формы. Зазор между конусными поверхностями рабочих органов образует рабочую камеру. Роторы вращаются в противоположные стороны, при этом скорость вращения внешнего корпуса меньше скорости вращения внутреннего дробящего конуса.

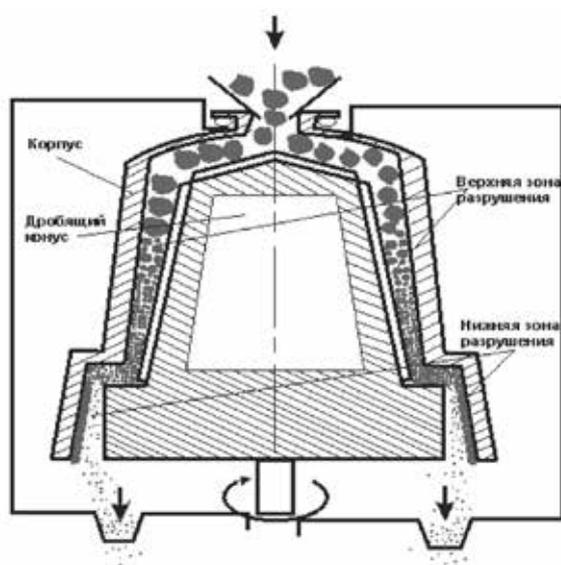


Рис. 1. Схема конструкции конусной дробилки, общий вид лабораторной модели

Исходный материал подается на верхнее основание вращающегося внутреннего дробящего конуса, где куски материала при помощи радиально расположенных разгонных ребер нагнетаются в рабочую камеру. За счет центробежной силы материал прижимается к верхнему корпусу и заполняет камеру. Куски породы, прижатые к внутреннему рабочему органу, вращаются при помощи продольных ребер вместе с ним, т.е. в сторону, противоположную вращению внешнего корпуса и прижатого к нему центробежными силами материала.

Экспериментальные исследования на опытном образце мельницы проводились в лабораторных условиях с исходной крупностью кварцевой руды 5 мм, с использованием в качестве имитаторов частиц золота частиц свинца – маркеров – разной конфигурации и параметров. Применение таких маркеров, обладающих свойством сохранения памяти в виде деформаций формы, позволяет определить интенсивность динамических контактов, т.е. количество и величину механических воздействий, а также зафиксировать характер и направление перемещения потоков внутри рабочей зоны дробления и измельчения.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе экспериментальных работ по изучению эффективности измельчения конусной мельницы было подтверждено, что эффективное разрушение геоматериалов происходит при максимальной загрузке мельницы, где на первой рабочей камере образуется плотная зона разрушения кусков друг с другом.

Определение гранулометрического состава продуктов измельчения геоматериала на конусной мельнице с дополнительной функцией изометризации частиц золота производилось посредством ситового анализа по классам крупности: $-4+3$ мм; $-3+2$ мм; $-2+1,65$ мм; $-1,6+1$ мм; $-1+0,63$ мм; $-0,63+0,315$ мм; $-0,315+0,1$ мм; $-0,1+0,063$ мм; $-0,063$ мм. Результаты гранулометрического анализа состава измельченного материала для разного значения дебита измельчаемого материала представлены на рисунке 2.

Степень измельчения в принятых значениях дебита (производительности) составляет: для 15 кг/ч – 3,2; для 20 кг/ч – 3,8. Наибольшая степень измельчения достигается при производительности 30 кг/ч – 5,3, т.е. при максимальной загруженности лабораторной установки.

В режиме подачи материала более 60% от максимально возможной загрузки (30 кг/ч) обломки руды постепенно переполняют рабочую полость мельницы. При этом образуются два основных слоя материала (1 и 2), перемещающихся круговым движением в противоположных направлениях (рис. 3) вследствие противоположного вращения внешнего и нижнего рабочих органов. Слой 1 зафиксирован центробежной силой к внешней стенке рабочей полости мельницы и в соответствии с этим движется по ходу вращения верхнего корпуса. Частицы, примыкающие к внутренней стенке 6 рабочей полости, прижатые продольными ребрами 5, движутся по ходу вращения нижнего ротора, т.е. в обратную сторону относительно слоя, «прикрепленного» к стенке верхнего ротора ребрами и силой трения.



Рис. 2. Динамика изменения гранулометрического состава продуктов измельчения в зависимости от производительности лабораторного образца конусной мельницы

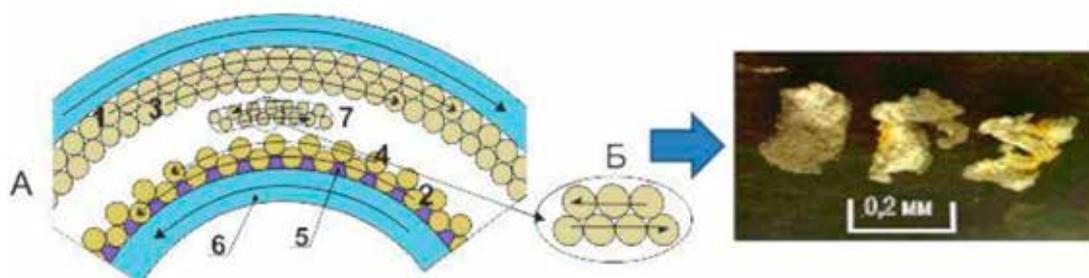


Рис. 3. Два противоположных слоя материала на верхней зоне рабочей полости

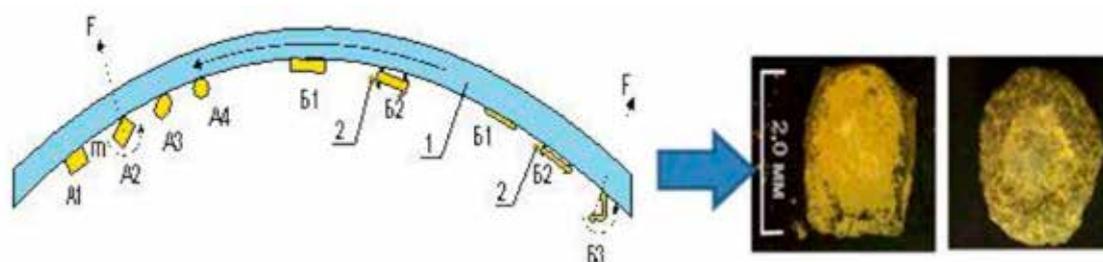


Рис. 4. Схема последовательности формирования различных видов деформации маркеров в нижней части рабочей камеры конусной мельницы

Каждый из основных слоев имеет прилегающие к ним слои 3 и 4, которые вовлечены в движение по направлению движения «крайних» слоев 1 и 2. За счет плотного контакта разнонаправленно движущихся частиц геоматериала образуется зона интенсивного разрушения 7.

Вместе с тем частицы маркеров в зависимости от загруженности рабочей полости установки претерпевают разные виды деформации. Методом бинокулярного изучения были выявлены следующие виды деформаций свинцовых маркеров. Наиболее крупные частицы (от 2 до 3 мм) при режиме подачи материала более 60% от максимальной загрузки в большинстве случаев приобретают вид плотных сфероидов.

В рабочей зоне нижней части мельницы интенсивность изометризации существенно увеличивается за счет частичной разрядки стесненных условий работы измельчителя и дополнительного плеча активатора на нижней части внутреннего рабочего органа, которая сбрасывает частицы на поверхность против вращающегося внешнего корпуса. При этом основная масса легкого измельченного рудного материала за счет потери инерции и в результате упругих динамических контактов выводится из рабочей зоны. Таким путем на поверхности нижней части внешнего рабочего органа

создается более разреженная обстановка, где и происходит изометризация тяжелых ковких частиц – имитаторов золота.

Особенность деформации ковких частиц в процессе измельчения обусловлена разностью скоростей перемещения частиц измельчаемой породы и свинцовых маркеров. Установлено, что при обработке частиц мелкообломочным материалом деформированию преимущественно подвергаются те участки поверхности ковких материалов, которые имеют наименьший радиус кривизны. В этом плане очень характерной является динамика деформации частиц пластинчатой формы, представленной на рисунке 4. Через некоторое время обработки края пластины приобретают определенную форму тора. Пластина укорачивается, но на краю образуется утолщение, при этом первоначальный объем и, соответственно, масса сохраняются.

Частицы комковатой формы с относительно сглаженными сторонами и сбитыми вершинами легко перекатываются под воздействием потока и приобретают вид, близкий к сфероиду (А и А4).

Если маркер (Б1) имеет форму утолщенной пластины, в процессе помола он получает удары по краям, движущимся под воздействием образующего воздушного потока с мелкообломочным материалом 2.

Края пластины расковываются, и пластина Б1 преобразуется в вид тороида, показанного на рисунке 4-Б2. При более продолжительном пребывании ковкие частицы пластинчатой формы сворачиваются в рулоны или в конверты, и в конечном счете частицы изометризируются и приобретают сферовидную форму.

Характерны результаты исследований со специальными маркерами пластинчатой формы размером 0,5x2x3 мм, представляемой как форма частиц, наиболее сложная к изометризации. При обработке частиц на мельнице с дополнительной функцией изометризации 30% полезного компонента сохранили более или менее свою изначальную форму, 55% из них превратились в тороиды с перегородкой внутри, 15% приобрели сфероидную форму.

Таким образом, в испытанной мельнице сохраняется высокая степень измельчения и усиливается эффект изометризации ковких компонентов руды (золота), что показано на примере свинцовых маркеров.

С точки зрения технологии последующего извлечения золота гравитационным способом важно повышение гидравлической крупности частиц после обработки. Экспериментальные работы по изучению

трансформации свойств раскрытых и свободных ковких частиц в конусной мельнице показали, что в процессе повышения гидравлической крупности пластинчатых частиц существенную роль играют интенсивные столкновения маркера с измельченным материалом в нижней зоне рабочей камеры мельницы. Наибольшая степень увеличения толщины частиц наблюдается при максимальной загрузке мельницы (до 30 кг/ч), что приводит к существенному повышению их извлекаемости методами сухого обогащения (сепарации) за счет повышения их гидравлической крупности (ГК) от 1,5 раза. На рисунке 5 представлена зависимость гидравлической крупности от параметров частиц маркеров после обработки на конусной мельнице при исходной ГК 19 см/с.

Например, для испытанных специальных маркеров пластинчатой формы размером 0,5x2x3 мм с усредненной массой 26 мг исходная скорость погружения частиц (гидравлическая крупность) составляет 19 см/с. После обработки на мельнице полученные частицы тороидной формы сохраняют исходную массу, но в зависимости от толщины тора гидравлическая крупность варьируется от 28 до 32 см/с.

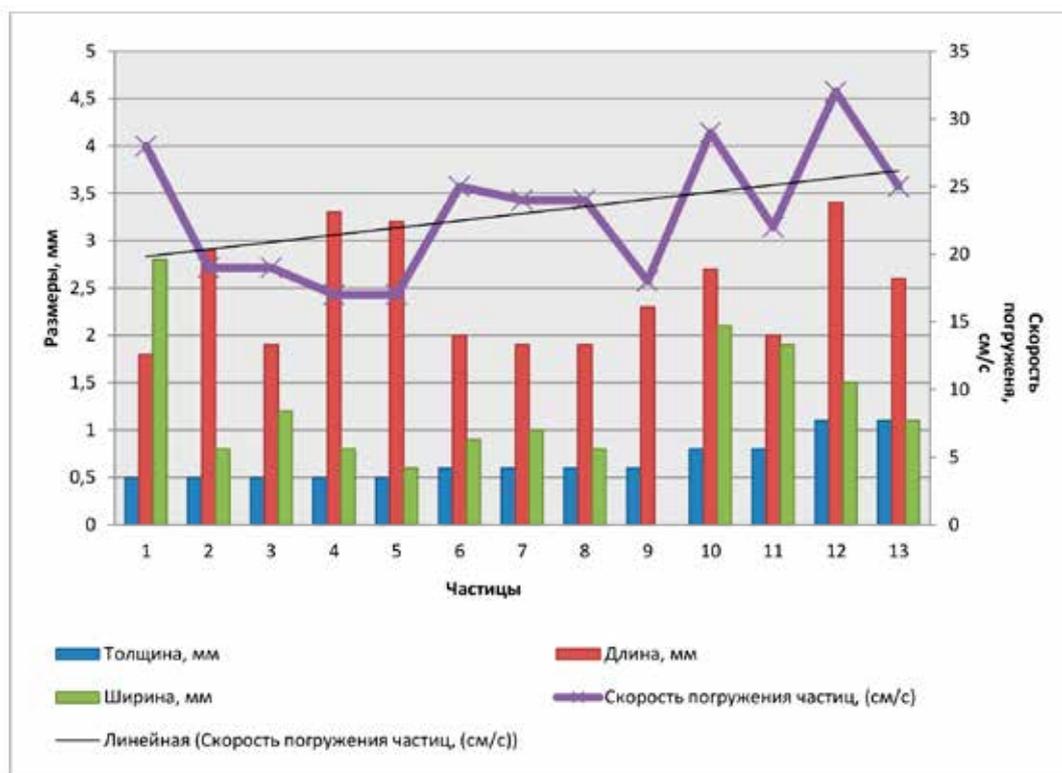


Рис. 5. Зависимость гидравлической крупности от параметров частиц свинцовых маркеров после обработки на конусной мельнице при исходной ГК 19 см/с

Заключение

В результате экспериментальных исследований по измельчению рудного материала крупностью фракции – 5 мм с имитаторами свободного золота в виде частиц свинца на лабораторной модели конусной двухступенчатой мельницы установлено, что высокая эффективность измельчения достигается при максимальной загруженности рабочей зоны. Изометризации (комкованию) подвергаются все частицы свинца в диапазоне крупности 0,5–3 мм, что приводит к существенному повышению их извлекаемости гравитационными методами обогащения за счет повышения их гидравлической крупности от 1,5 раза.

Сохранение физического веса ковких частиц при измельчении и повышение их извлекаемости в процессе помола в новой модели мельницы являются наиболее важными особенностями и одновременно преимуществом разработанной конструкции

применительно к переработке золотосодержащих руд методами сухого обогащения.

Лабораторные исследования проводились на оборудовании ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН (грант №13.ЦКП.21.0016).

Список литературы

1. Винокуров В.Р. Применение мельницы сухого многократного ударного действия при измельчении золотосодержащих руд месторождения «Малый тарын» // Горный информационный аналитический бюллетень. 2021. № 12-1. С. 48-58.
2. Лебедев И.Ф., Крылатова С.Р., Гаврильев Д.М., Яковлев Б.В. Статистический метод определения движения частицы в винтовом // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 9. С. 165-171.
3. Газалеева Г.И., Цыпин Е.Ф., Червяков С.А. Рудоподготовка. Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению. Екатеринбург: ООО «УЦАО», 2014. 914 с.
4. Филиппов В.Е., Гаврильев Д.М., Лебедев И.Ф., Осипов Д.А. Центробежный конусный истиратель с зоной изометризации ковких частиц // Патент РФ № 209676. Патентообладатель ИГДС СО РАН. 2022. Бюл. № 8.
5. Матвеев А.И., Осипов Д.А., Яковлев Б.В. Моделирование динамики формы плоского тела из ковкого металла при изотропной бомбардировке частицами песка // Математические заметки СВФУ. 2017. № 1. С. 99-108.

УДК 628.316.12

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ШЛАКА В СИСТЕМЕ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ПТИЦЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА

Старостина И.В., Локтионова Е.В., Порожнюк Л.А., Лупандина Н.С.,
Кiryushina Н.Ю., Писклов М.А., Лушников А.С.

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»,
Белгород, e-mail: starostinairinav@yandex.ru

На сегодняшний день для всего человечества актуальна проблема очистки сточных вод мясо- и птицеперерабатывающей промышленности. Более 70% загрязняющих веществ сточных вод мясокомбинатов представляют собой жирно-белковые комплексы, подверженные аэробному окислению и образованию веществ, обладающих скверным запахом. Концентрация взвешенных веществ производственных стоков может достигать 7300 мг/дм³. Рассмотрена возможность использования реагента, полученного в результате кислотной модификации саморассыпающегося электросталеплавильного шлака. В качестве модифицирующего реагента использовали концентрированную серную кислоту. Модифицированный продукт подвергли сушке до постоянной массы при температуре не выше 55 °С, а затем измельчали до порошкообразного состояния. В результате кислотной обработки электросталеплавильного шлака ОЭМК гидравлического охлаждения происходит выщелачивание основных оксидов с образованием кристаллов дигидрата сульфата кальция, сульфата железа и коллоидной кремниевой кислоты. Коагуляция высокодисперсной кремнекислоты происходит на поверхности частиц двудородного гипса в момент его кристаллизации, что способствует формированию высокодисперсной структуры CaSO₄·2H₂O с высокой степенью аморфизации. Это позволяет использовать полученный реагент в качестве железокремниевый флокулянт-коагулянт в системе очистки сточных вод многокомпонентного состава. Железо-кремниевый коагулянт-флокулянт использовали для очистки сточных вод цеха убой птицеперерабатывающего производства ЗАО «Приосколье» с химическим потреблением кислорода (ХПК) 7350 мг/дм³ и начальной мутностью 349 NTU. Окончание процесса коагуляции и формирование осадка происходит после 13 мин отстаивания. Показано, что полученный реагент при расходе – 1,0 г/дм³ обеспечивает эффективность очистки сточных вод 87%.

Ключевые слова: многокомпонентные сточные воды, птицеперерабатывающее производство, агропромышленный комплекс, сталеплавильный шлак, железокремниевый флокулянт-коагулянт

APPLICATION OF MODIFIED STEELMAKING SLAG IN POULTRY-PROCESSING INDUSTRIAL WASTEWATERS PURIFICATION SYSTEM

Starostina I.V., Loktionova E.V., Porozhnyuk L.A., Lupandina N.S.,
Kuryushina N.Yu., Pisklov M.A., Lushnikov A.S.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod,
e-mail: starostinairinav@yandex.ru

Currently the problem of meat-processing and poultry-processing industrial wastewaters purification is rather urgent. Over 70% of pollutants in meat-processing plants' wastewaters are fat-protein complexes, prone to aerobic oxidation and to formation of substances, which have offensive odor. The concentration of suspended matter in such industrial wastewaters can amount to 7300 mg/dm³. The possibility of using a reagent, obtained as a result of slaking electric-furnace steelmaking slag acidic modification, has been considered. As a modifying reagent the concentrated sulfuric acid was used. The modified product was dried to constant mass at temperature no more than 55 °C and then ground to powdery condition. The acidic treatment of OEMW hydraulically-cooled electric-furnace steelmaking slag results in leaching of basic oxides with the formation of crystals of calcium sulfate dehydrate, ferrous sulfate and colloidal silicic acid. Coagulation of finely-dispersed silicic acid takes place on the surface of calcium sulfate dihydrate particles at the moment of its crystallization, which promotes the formation of finely-dispersed structure of CaSO₄·2H₂O with high amorphization degree. This allows using the obtained reagent as a ferrosilicon flocculant-coagulant in multicomponent wastewaters purification system. The ferrosilicon flocculant-coagulant was used for purifying wastewaters from the slaughter room of poultry-processing plant of ZAO «Prioskolye» with COD 7350 mg/dm³ and initial turbidity 349 NTU. The end of coagulation process and the sediment formation are observed after 13 minutes of settling. It is demonstrated that the obtained reagent at consumption rate – 1.0 g/dm³ provides wastewater purification efficiency – 87%.

Keywords: multicomponent wastewaters, poultry-processing industry, agro-industrial complex, steelmaking slag, ferrosilicon flocculant-coagulant

Сточные воды мясоперерабатывающих производств представляют собой сложные многокомпонентные системы и характеризуются как высококонцентрированные

по содержанию органических загрязнений, к которым относятся в основном кровь, частицы мяса, жиры, кожа, навоз, каньга, шерсть, остатки продукции. К неорганиче-

ским загрязняющим компонентам относятся песок, глина, моющие средства, нитраты и хлориды натрия. Все стоки мясопереработки включают производственные и бытовые сточные воды.

По виду загрязняющих веществ и их содержанию все сточные воды мясоперерабатывающих комбинатов можно разделить на шесть основных потоков, которые представлены в табл. 1.

Из общего объема сточных вод объем производственных стоков составляет 70–75%, не содержащих жир – 4–8%, а условно чистых – 14–18% [1, 2].

Содержание взвешенных веществ в стоках варьируется в значительных пределах – от 500 до 7300 мг/дм³. По фазово-дисперсному составу взвешенные вещества можно разделить на несколько групп: грубодисперсные взвеси, на долю которых приходится 20% от общего количества, надколлоидные – около 40%, коллоидные – около 20% и растворимые примеси 20%. Более 70% загрязняющих веществ представляют собой жиро-белковые комплексы, подверженные аэробным процессам окисления, что сопровождается образованием летучих веществ с неприятным запахом [3–5]. Кроме того, наличие в стоках компонентов крови придает им высокую цветность – от темно-серого до красно-бурого [6].

При поступлении сточных вод мясоперерабатывающих предприятий в канализационную сеть органические вещества склеивают загрязнения и прилипают к стенкам каналов, что приводит к снижению скорости потока и образованию застоев. Кроме

того, в подобных стоках содержится большое количество особо опасных патогенных микроорганизмов – кишечная палочка, яйца глистов, сибирская язва и др. Таким образом, сброс таких вод в городскую канализацию или природные объекты без надлежащей очистки является недопустимым правонарушением.

Доведение концентрации загрязняющих веществ до законодательно установленных нормативов осуществляют на очистных сооружениях (рис. 1), включающих несколько этапов (табл. 2) [7].

Для ускорения осветления стоков и формирования осадка из взвешенных веществ при отстаивании или повышения эффективности флотационных установок используют физико-химические процессы коагуляции и флокуляции, что предполагает использование соответствующих реагентов – коагулянтов (соединений железа и алюминия) и флокулянтов (высокомолекулярных органических соединений). В работе [8] показано, что наиболее предпочтительно применение хлорного железа, поскольку высокая эффективность (95%) достигается в широких диапазонах расхода и уровня pH среды, однако данный коагулянт обладает сильным корродирующим эффектом. Результаты исследований, представленные в работе [9], показали, что наилучший результат получен при использовании в качестве коагулянта $Al_2(SO_4)_3$ с расходом 50 мл/дм³ без корректировки pH. Однако при этом отмечается высокое содержание остаточного алюминия – 0,41 мг/дм³.



Рис. 1. Типовая схема очистных сооружений мясоперерабатывающих предприятий

Таблица 1

Классификация сточных вод мясокомбинатов

№ п/п	Источник образования	Основные компоненты
I	Предубойные загоны	Навоз, супеси, суглинки, остатки комбикормов
II	Убойные цеха	Каныга, жир, кровь, кусочки живой ткани
III	Цех разделки и переработки мяса	Органические загрязнители – жир, кровь, шерсть, шкура; неорганические – преимущественно нерастворимые примеси.
IV	Смесь – санитарная бойня, изолятор, карантин	Жир, кровь, остатки ткани, шерсть, патогенная микрофлора
V	Остальные стоки комбината, включая производства медицинских и технических препаратов	Моющие средства, хлористый натрий, сегменты живой ткани
VI	Котельные и силовые установки, теплообменные аппараты, вакуум-насосы	Условно чистые стоки – незагрязненные.

Таблица 2

Этапы очистки стоков мясоперерабатывающей промышленности

Наименование этапа	Характеристика процесса очистки
Механическая очистка	Использование усреднителей, решеток и жируловителей
Реагентная обработка	Использование химических реагентов для извлечения растворенных и коллоидных загрязнителей
Флотационная обработка	Обволакивание пузырьками воздуха хлопьев с загрязняющими веществами и образование слоя пены на поверхности воды
Биологическая очистка	Удаление органических соединений с использованием аэробных и анаэробных микроорганизмов
Обеззараживание	Использование озоновой и ультрафиолетовой дезинфекции для дальнейшего сброса в водоем

В качестве коагулянтов все чаще используются комбинированные коагулянты-флокулянты, полученные в результате кислотной модификации железо- или алюминий-содержащих материалов как природного, так и техногенного происхождения [10, 11].

Известно получение железо-алюминий-содержащих коагулянтов путем выщелачивания оксидов железа и алюминия из глины и золы раствором серной кислоты в условиях повышенных температур (100–120 °С) [12].

В работе [13] проведена оценка эффективности применения алюмосиликатного коагулянта, полученного в результате разложения нефелинового концентрата 20–30%-ным раствором серной кислоты. Показано, что полученный реагент эффективен при осаждении тонких взвесей буровых глин, взвесей из сливов флотомашин и оборотной воды апатитового производства и может быть использован для очистки промышленных и коммунальных сточных вод.

Ранее проведенные исследования [14, 15] показали эффективность использования же-

лезокремниевый флокулянт-коагулянт (ЖКФК) – продукта кислотной модификации шлака ОЭМК для очистки модельных эмульсий. Показано, что в качестве модификатора использовали 1Н раствор серной кислоты. И полученный порошкообразный реагент обеспечивает эффективность очистки модельной эмульсии 99,3 %.

Цель исследования – рассмотрение возможности использования реагента, полученного в результате кислотной модификации саморассыпающегося электросталеплавильного шлака, для очистки реальных стоков цеха убоя мясоперерабатывающего предприятия.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования использовали высокоосновный, саморассыпающийся шлак электросталеплавильного производства Оскольского электрометаллургического комбината (ОЭМК) (г. Старый Оскол), полученный по гидравлической технологии охлаждения.

Таблица 3

Химический состав шлака ОЭМК

Содержание, мас. %							Модуль основности, M_o
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe _{общ.}	MnO	MgO	Cr ₂ O ₃	
40,0–48,3	20,0–27,2	2,3–6,3	7,0–15,5	0,5–6,0	6,0–12,0	0,1–2,0	1,7–2,0

Гидравлическая технология охлаждения, используемая в настоящее время на комбинате, основана на распылении воды после первичной кристаллизации шлака (при достижении температуры поверхности расплава около 600–650°C) с целью интенсификации процесса охлаждения. В результате чего происходит окмкование частиц шлака с образованием смеси из пылевидных частиц и крупных конгломератов. Химический состав и некоторые технологические свойства шлака представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 4

Технологические характеристики шлака ОЭМК

Показатель	Значение
Истинная плотность частиц, кг/м ³	3200
Содержание (CaO+MgO) _{актив.} , %	2,4–3,6
Удельная поверхность, м ² /кг	170–210

Шлак ОЭМК относится к саморассыпавшемуся, подверженному в процессе охлаждения полиморфному превращению

двухкальциевого силиката (C₂S) из β- в γ-модификацию, что сопровождается увеличением объема кристаллической решетки на 13%, приводит к растрескиванию и рассыпанию монолита шлака в порошок. Минералогический состав шлака по результатам рентгенофазового анализа представлен следующими основными минералами: γ-C₂S (шеннонит), вюстит, периклаз, ферриты кальция, портландит и некоторое количество свободной извести, что обеспечивает щелочную среду водной вытяжки (pH = 11,0–12,5). В качестве модифицирующего реагента использовали концентрированную серную кислоту. После модификации шлака полученный продукт подвергали сушке до постоянной массы при температуре не выше 55 °С, что обусловлено образованием сульфатов кальция различной степени обводненности в продукте модификации [14], далее измельчали до порошкообразного состояния и использовали в качестве комбинированного коагулянта-флокулянта. Минералогический состав продукта химической модификации шлака ОЭМК представлен на рис. 2.

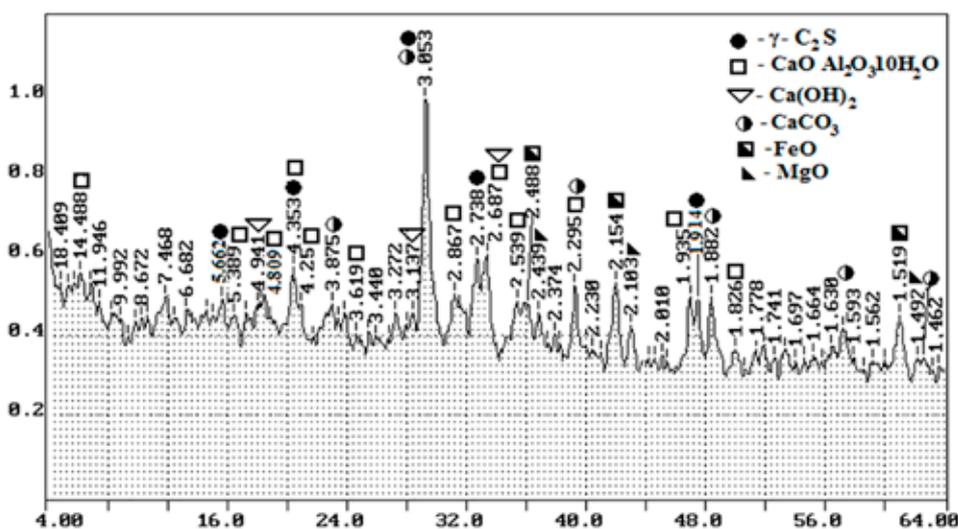


Рис. 2. Результаты рентгенофазового анализа (РФА) продукта химической модификации шлака ОЭМК гидравлического охлаждения

Таблица 5

Химический состав сточной воды цеха убоя птицепереработки

ХПК, мг О/дм ³	БПК _{полн} , мг О ₂ /дм ³	Взвешенные вещества, мг/дм ³	Жиры, мг/дм ³	Цветность, град.	Мутность, NTU
7350	3420	310	21,5	6870	349

В результате кислотной обработки электросталеплавильного шлака ОЭМК гидравлического охлаждения происходит выщелачивание основных оксидов с образованием кристаллов дигидрата сульфата кальция, сульфата железа и коллоидной кремниевой кислоты. Коагуляция высокодисперсной кремнекислоты происходит на поверхности частиц двухводного гипса в момент его кристаллизации, что способствует формированию высокодисперсной структуры $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ с высокой степенью аморфизации. Это позволяет использовать полученный реагент в качестве комбинированного флокулянта-коагулянта в системе очистки сточных вод сложного состава.

В качестве водной среды использовали сточную воду цеха убоя птицеперерабатывающего производства ЗАО «Приосколье» (Белгородская область), характеристики которой представлены в табл. 5.

Осветление сточных вод осуществляли методом отстаивания. Эффективность очистки оценивали по изменению мутности сточной воды. Фиксировали также динамику образования осадка в процессе отстаивания. Мутность водной среды до и после

очистки определяли на портативном турбидиметре-мутномере HANNA HI 98307.

Результаты исследования и их обсуждение

Сточная вода цеха убоя птицеперерабатывающего производства характеризуется высокой цветностью и седиментационной устойчивостью. В пробах на протяжении всего отстаивания в течение нескольких часов отсутствовала четкая граница раздела осветленного слоя воды и осадка. Для ускорения процесса осветления воды и формирования осадка экспериментальным путем подбирали оптимальный расход комбинированного флокулянта-коагулянта. Исследуемый сток помещали в химические стаканы емкостью 500 см³, добавляли в качестве флокулянта-коагулянта различные массы модифицированного шлака (от 0,15 до 0,4 г), доводили значение pH среды до 8,5–9,0 единиц 2N раствором NaOH. Перемешивание осуществляли магнитной мешалкой – в течение первых двух минут быстрое перемешивание и еще восемь минут – медленное. Далее полученную смесь переливали в цилиндры и наблюдали за процессом коагуляции с течением времени.

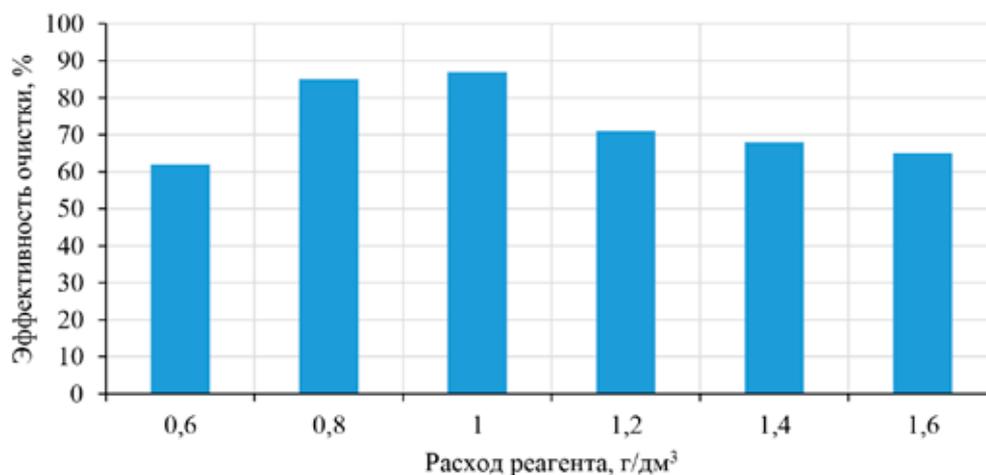


Рис. 3. Зависимость эффективности очистки сточных вод от расхода реагента – модифицированного шлака ОЭМК

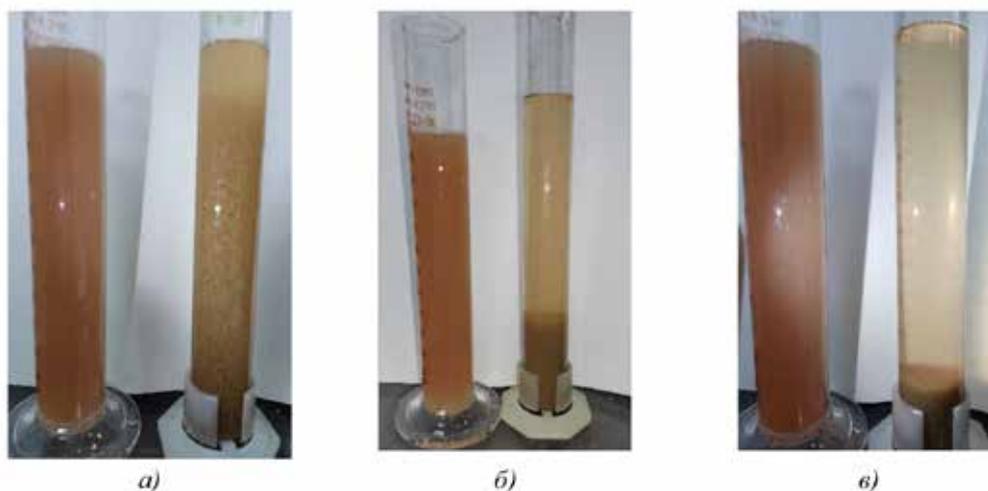


Рис. 4. Динамика изменения высоты осадка при использовании полученного комбинированного флокулянта-коагулянта с расходом 1 г/дм^3 , через: а) 2 минуты, б) 8 минут, в) 13 минут отстаивания

Через 60 мин отстаивания отбирали пробу с верхнего слоя воды на глубине 30 мм и определяли ее мутность, концентрацию взвешенных веществ. Оптимальной считалась доза реагента, при которой содержание взвешенных веществ в верхнем слое исследуемой воды после 60-минутного отстаивания было минимальным. Результаты эффективности очистки по взвешенным веществам представлены на рис. 3.

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что максимальное значение эффективности очистки (87%) достигается при добавлении в качестве флокулянта-коагулянта шлама ОЭМК, модифицированного серной кислотой, в количестве $0,25 \text{ г}$ на 250 см^3 сточной воды, что составляет 1 г/дм^3 .

На рис. 4 представлена динамика процесса коагуляции при оптимальном расходе флокулянта-коагулянта – 1 г/дм^3 . На рис. 4, а, отчетливо видно начало хлопьеобразования на второй минуте отстаивания стока в цилиндре и последующее осаждение взвешенных веществ. Окончание процесса коагуляции и формирование осадка происходит после 13 минут отстаивания (рис. 4, в).

Заключение

Полученные результаты позволяют рекомендовать использование реагента – продукта кислотной модификации саморассыпающегося сталеплавильного шлама в качестве комбинированного флокулянта-

коагулянта для очистки многокомпонентных сточных вод птицеперерабатывающих предприятий.

Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы

1. Пальгунов Н.В., Абрамов А.Н. Очистка сточных вод мясоперерабатывающих заводов // Экология и промышленность России. 2000. № 16. С. 4–6.
2. Натыничик Т.М., Левшук О.Н., Засимович Т.И. Значение и уровни очистки сточных вод на мясоперерабатывающих предприятиях // Инновационные подходы в ветеринарной и зоотехнической науке и практике: материалы Международной научно-практической интернет-конференции (Ставрополь, 1–5 февраля 2016 г.). Ставрополь, 2016. С. 518–524.
3. Боковикова Т.Н., Пирузян А.В., Марченко Л.А., Найденов Ю.В. Сравнительная оценка возможности применения различных сорбентов для очистки производственных сточных вод мясоперерабатывающих предприятий // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2009. № 6. С. 102–105.
4. Собгайда Н.А., Данилова Е.А. Очистка сточных вод малых предприятий мясоперерабатывающей промышленности // Экология и промышленность России. 2005. № 2. С. 18–20.
5. Степанов С.В., Беляков А.В. Очистка сточных вод предприятий пищевой промышленности с применением модульных очистных сооружений высокой заводской готовности // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии / Под ред. М.В. Шувалова, А.А. Пищулева, А.К. Стрелкова. Самара: Издательство Самарский государственный технический университет, 2020. С. 231–243.
6. Комаров В.И., Мануйлова Т.А. Проблемы экологии в пищевой промышленности // Экология и промышленность России. 2002. № 11. С. 4–7.

7. Сатыбалдиева Д.К., Намазбекова Ж.Б. Очистка сточных вод мясоперерабатывающих предприятий // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. 2014. № 4. С. 77–80.
8. Махлай К.А., Цейтлин М.А., Райко В.Ф. Очистка сточных вод убойного цеха птицефабрики коагуляцией // Вісник НТУ «ХП». 2019. № 10 (1335). С. 101–108.
9. Степанов С.В., Солкина О.С., Авдеенков П.П., Беляков А.В., Степанов А.С. Механические и физико-химические методы очистки сточных вод рыбоперерабатывающей промышленности // Градостроительство и архитектура. 2021. Т. 11. № 1 (42). С. 63–71.
10. Vasilenko T.A., Koltun A.A. Chemical aspects of the obtaining of iron-containing coagulant-flocculant from electric steel melting slag from wastewater treatment. *Solid State Phenomena*. 2017. Т. 265. P. 403–409.
11. Свергузова С.В., Сапронова Ж.А., Святченко А.В. Технология получения железосодержащего коагулянта из отходов сталеплавильного производства для очистки ливневых вод // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 12. С. 160–164.
12. Ханин А.Б., Иванов А.Д., Будыкина Т.А. Способ получения коагулянта // Патент № 2 122 975. 1998. Заявка 97103975/25.
13. Веляев Ю.О., Майоров Д.В., Матвеев В.А. Исследования эффективности применения алломосиликатного коагулянта на основе нефелина // Водоснабжение и санитарная техника. 2013. № 3–1. С. 32–37.
14. Старостина И.В., Кирюшина Н.Ю., Локтионова Е.В., Матушкина А.В. Получение железокремниевое флокулянта-коагулянта из отхода металлургического производства и его применение в процессе очистки эмульгированных сточных вод // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26. № 7. С. 20–25.
15. Старостина И.В., Пендюрин Е.А., Локтионова Е.В., Лушников А.С., Матушкина Э.В. Использование композиционного флокулянта-коагулянта, полученного на основе сталеплавильного шлака, для очистки модельных эмульсий личиночного масла мухи Черная львинка (*Hermetia illucens*) // Научные технологии и инновации (XXIV научные чтения: сборник докладов Международной научно-практической конференции (Белгород, 21–22 октября 2021 г.). Белгород: Изд-во БГТУ, 2021. С. 333–340.

УДК 550.3

СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ – ОСНОВА НОВОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЙ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН – СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КАРОТАЖА

Чердынцев С.Н.

ООО «Оренбурггеопроект», Оренбург, e-mail: 89501818580@mail.ru

В статье рассматривается применение на нефтяных месторождениях Оренбургской области нового геофизического метода исследований скважин – сейсмоэлектрического каротажа, основанного на изучении и анализе сейсмоэлектрического эффекта, возникающего во флюидонасыщенных осадочных горных породах в результате их электризации при относительном смещении твердой и жидкой фаз под воздействием упругих волн. Приводится обзор литературных источников по исследованию сейсмоэлектрического эффекта в лабораторных, полевых и скважинных условиях. Описываются физические предпосылки, определяющие возможности применения нового геофизического метода исследования нефтяных скважин – сейсмоэлектрического каротажа для решения конкретных геологических, технических и научно-исследовательских задач. В основе метода сейсмоэлектрического каротажа лежит метод потенциалов собственной поляризации при одновременном акустическом воздействии на зону исследования и применении мегаэлектродного блока. Применение метода потенциалов собственной поляризации для выделения в карбонатном разрезе коллекторов и оценки характера их насыщенности представляет достаточно сложную задачу и вызывает определенные трудности в связи со слабой дифференцированностью и малой амплитудой каротажных диаграмм. За счет наложения акустического поля на зону исследования и применения мегаэлектродного блока при записи каротажных диаграмм значительно повышается информативность метода потенциалов собственной поляризации. Дается краткое описание комплекса сейсмоэлектрического каротажа, принцип действия, состав аппаратуры, методика измерений и результаты применения на нефтяных месторождениях Оренбургской области. Приведены результаты скважинных натурных измерений, полученных при помощи предлагаемого аппаратного комплекса. Путем применения комплекса сейсмоэлектрического каротажа предлагается решение задачи детального выделения продуктивных пластов в карбонатном разрезе.

Ключевые слова: сейсмоэлектрический эффект, сейсмоэлектрический каротаж, скважина, метод потенциалов собственной поляризации, мегаэлектродный блок, каротажная диаграмма, горная порода, Оренбургская область

THE SEISMOELECTRIC EFFECT IS THE BASIS OF A NEW GEOPHYSICAL METHOD OF OIL WELL RESEARCH – SEISMOELECTRIC LOGGING

Cherdyntsev S.N.

LLC «Orenburggeoproekt», Orenburg, e-mail: 89501818580@mail.ru

The article discusses the application of a new geophysical method of well research - seismoelectric logging in oil fields of the Orenburg region, based on the study and analysis of the seismoelectric effect that occurs in fluid-saturated sedimentary rocks as a result of their electrification with relative displacement of solid and liquid phases under the influence of elastic waves. A review of literature sources on the study of the seismoelectric effect in laboratory, field and borehole conditions is given. The physical prerequisites determining the possibilities of using a new geophysical method of oil well research - seismoelectric logging for solving specific geological, technical and scientific research tasks are described. The method of seismoelectric logging is based on the method of intrinsic polarization potentials with simultaneous acoustic impact on the study area and the use of a megaelectrode block. The application of the method of intrinsic polarization potentials for isolating reservoirs in the carbonate section and assessing the nature of their saturation is a rather difficult task and causes certain difficulties due to the weak differentiation and small amplitude of logging diagrams. Due to the imposition of an acoustic field on the study area and the use of a megaelectrode block when recording logging diagrams, the informativeness of the method of intrinsic polarization potentials is significantly increased. A brief description of the complex of seismoelectric logging, the principle of operation, the composition of the equipment, the measurement technique and the results of application in the oil fields of the Orenburg region is given. The results of borehole field measurements obtained using the proposed hardware complex are presented. By using a complex of seismoelectric logging, a solution to the problem of detailed isolation of productive layers in a carbonate section is proposed.

Keywords: seismoelectric effect, seismoelectric logging, well, method of intrinsic polarization potentials, megaelectrode block, logging diagram, rock, Orenburg region

Явления и эффекты, возникающие в геологической среде, представляют собой сложные механо-физические процессы, а также зависят от параметров источников полей и от физических свойств неоднородной многофазной среды. Взаимодействие сейсмического и электрического полей в настоящее время вызывает практический инте-

рес, связанный с возможностью создания новых методов изучения глубинных процессов, происходящих в скважинах.

Сейсмическое и электрическое поля – одни из самых изученных типов физических полей, которые существуют в геофизической среде, широко используются на практике (в разведке) и которые можно

эффективно создавать и измерять. Поэтому изучение их взаимных преобразований перспективно как с теоретической, так и с практической точек зрения [1].

В настоящей статье рассматривается возможность применения нового геофизического метода исследования нефтяных скважин – сейсмоэлектрического каротажа для решения ряда геологических, технических и научно-исследовательских задач.

Физической предпосылкой к практической реализации метода сейсмоэлектрического каротажа является экспериментальный факт наблюдения в горных породах, слагающих осадочный чехол земной коры, так называемых сейсмоэлектрических явлений.

Сейсмоэлектрический каротаж – метод геофизических исследований скважин, основанный на изучении сейсмоэлектрического эффекта горных пород, возникающего в результате их электризации при относительном смещении твердой и жидкой фаз под воздействием упругих волн и наблюдающийся преимущественно во флюидонасыщенных осадочных горных породах.

Под сейсмоэлектрическим каротажем понимается скважинный геофизический метод потенциалов собственной поляризации (ПС) при одновременном акустическом воздействии на исследуемое скважинное пространство.

Сейсмоэлектрический эффект второго рода Е был открыт в 1939 г. русским ученым А.Г. Ивановым при полевых геофизических исследованиях. Он обнаружил возникновение электризации при прохождении упругих волн через влажную горную породу, т.е. возникновение разности электрических потенциалов между двумя соседними точками данной горной породы при воздействии на нее упругим полем.

Предположение А.Г. Иванова о природе сейсмоэлектрического эффекта Е заключается в следующем. На границе раздела жидкой и твердой фаз (минерального раствора и твердых частиц горной породы) присутствует двойной электрический слой, одна часть которого, обращенная к жидкости, движется за счет перепада давлений. В результате этого возникает разность электрических потенциалов [2].

Впоследствии многими исследователями были продолжены работы по изучению сейсмоэлектрического эффекта.

В 1971 г. Э.И. Пархоменко и И.В. Гаскаровым были осуществлены скважинные и лабораторные исследования сейсмоэлектрического эффекта второго рода в гор-

ных породах, была предложена методика наблюдений эффекта Е при непрерывной регистрации. На основании результатов опытов было установлено, что в скважинах действительно регистрируется сейсмоэлектрический эффект, возникающий в объеме осадочных пород, выявлено значительное различие между величиной сейсмоэлектрического эффекта в глинах и известняках (примерно в 5 раз), что служит основанием для возможности разделения этих пород по величине эффекта Е, отмечена качественная связь между величиной сейсмоэлектрического эффекта и кажущимся удельным сопротивлением горных пород. Это дает возможность судить о литологическом составе исследуемых горных пород и о флюидонасыщении коллекторов. Чем выше сопротивление, тем больше сейсмоэлектрический эффект. Получен различный характер зависимости сейсмоэлектрического эффекта от влажности для песчаников, известняков и мергеля. Для двух первых зафиксирован максимум, для третьего – область насыщения, т.е. некоторый интервал влажности, при котором эффект Е, достигнув максимума, практически не меняет свою величину. Различие, по-видимому, обусловлено неодинаковой структурой пород. Наблюдается сильная зависимость величины сейсмоэлектрического эффекта Е от концентрации раствора, заполняющего поры в породе. С увеличением степени минерализации насыщающего породу раствора величина эффекта Е уменьшается примерно по экспоненциальному закону [3].

В 2015 г. И.Г. Московским, О.М. Балабаном, О.С. Федоровой, А.В. Кочетковым была проведена работа «Математическое моделирование сейсмоэлектрического эффекта второго рода, порождаемого плоскими упругими волнами в пористых влагонасыщенных средах». На основании полученных результатов рекомендовано использовать регистрацию сейсмоэлектрического эффекта второго рода при возбуждении плоских продольных упругих волн для нахождения области резких изменений петрофизических свойств влагонасыщенного пласта [4].

В 2018 г. В.И. Костицын и В.А. Хмелевской описали практическое применение явления сейсмоэлектрического эффекта в сейсморазведке. Показано, что сейсмоэлектрический эффект обусловлен электрокинетическими процессами влагонасыщенных пород. Он определяется их минеральным составом, структурой и текстурой, а в основном пористостью, влажно-

стью, составом и концентрацией растворенных в воде солей [5].

В 2019 г. И.Я. Чеботаревой и А.Н. Камшилиным были проведены эксперименты по изучению особенностей сейсмoeлектрического эффекта второго рода при сильной латеральной неоднородности насыщения с использованием керна песчаника, насыщенного керосином или водными растворами NaCl. Сделан вывод о том, что для неполярной жидкости при наличии петрофизической латеральной неоднородности по насыщению изменение электрического отклика на близких частотах существенно отличается. Рекомендовано для получения достоверных результатов при акустическом воздействии использовать не одну частоту, а линейно модулированный по частоте сигнал с широким диапазоном частот воздействия [6].

В 2020 г. В.А. Давыдовым были проведены опытно-методические сейсмoeлектрические работы на плотине Ельчевского пруда-отстойника. По результатам исследований построены разрезы различных сейсмoeлектрических параметров, хорошо отображающих основные особенности и структурные элементы плотины. Введенный параметр усиления амплитуды электрического сигнала при прохождении упругой волны позволил наглядно представить характер поведения фильтрационного потока в разрезе плотины [7].

В 2020 г. И.Я. Чеботаревой и А.Н. Камшилиным были проведены эксперименты, свидетельствующие о влиянии характера насыщения горных пород на особенности проявления сейсмoeлектрического эффекта [8].

Целью исследования явилось изучение и анализ характера взаимного влияния сейсмического и электрического полей – сейсмoeлектрического эффекта при скважинных измерениях посредством практического применения аппаратного комплекса сейсмoeлектрического каротажа на нефтяных месторождениях Оренбургской области для решения задачи детального выделения продуктивных пластов в карбонатном разрезе.

Материалы и методы исследования

Автором настоящей статьи был создан аппаратный комплекс сейсмoeлектрического каротажа, состоящий из скважинного прибора [9] и наземного цифрового регистратора. Комплекс предназначен для исследования нефтяных скважин диаметром от 110 до 400 мм, заполненных жидкостью, с температурой до 150 °С и гидростатическим давлением до 100 МПа со скоростью каротажа до 2500 м/ч.

Аппаратура рассчитана на работу со следующими изделиями:

а) каротажными станциями, оборудованными пультом измерительным акустического каротажа для создания акустического поля в зоне регистрации разности электрических потенциалов горных пород;

б) кабелем грузонесущим геофизическим [10];

в) каротажными станциями, оборудованными пультом измерительным электрического каротажа для визуализации и регистрации разности электрических потенциалов горных пород.

Аппаратура предназначена для измерения величины разности электрических потенциалов горных пород в нефтяных скважинах при вибровоздействии в высокочастотных режимах ВЧ1 6 кГц, ВЧ2 12 кГц и ВЧ3 24 кГц.

Принципиальная схема аппаратуры сейсмoeлектрического каротажа представлена на рис. 1.

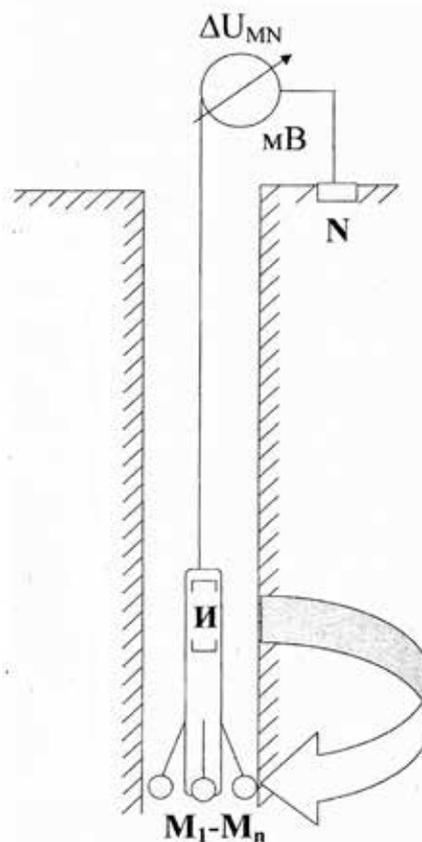
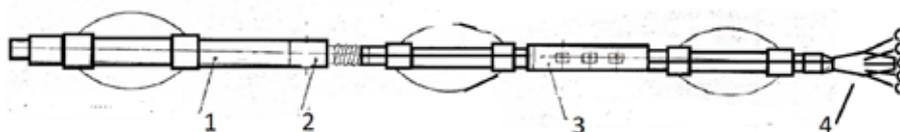


Рис. 1. Принципиальная схема аппаратуры сейсмoeлектрического каротажа: N – электрод, заземленный на поверхности; M₁–M_n – группа измерительных электродов, расположенных на прижимных устройствах; И – магнотриксционный излучатель



1. Электронный блок
2. Блок излучателя
3. Блок звукоприемников
4. Мегаэлектродный блок

Рис. 2. Принципиальная схема скважинного прибора сейсмoeлектрического каротажа:
1 – электронный блок, 2 – блок излучателя, 3 – блок звукоприемников, 4 – мегаэлектродный блок

Скважинный прибор (рис. 2) выполнен на базе отечественного скважинного прибора акустического каротажа АКВ-1. Прибор включает в себя блок излучателя 2, состоящий из трех магнитострикционных сердечников, на которых намотаны катушки. Излучатель имеет три диапазона частот: Частота излучателя в режиме ВЧ3 – 24 кГц, в режимах: ВЧ1 – 6 кГц, ВЧ2 – 12 кГц. Излучатель резонансный, при возбуждении его мощным электрическим импульсом он излучает колебания определенной частоты, которая зависит от размеров сердечника и количества витков катушки. В режиме ВЧ1 работают три катушки (6 кГц), в режиме ВЧ2 – две, соединенных последовательно (12 кГц), в режиме ВЧ3 работает одна катушка (24 кГц). Смена режимов излучателя производится посредством наземного цифрового регистратора. В приборе АКВ-1 в качестве чувствительного элемента предложен мегаэлектродный блок 4 с выносными прижимными датчиками в количестве 24 штук, расположенными радиально оси прибора. Мегаэлектродный блок крепится к нижней части скважинного прибора посредством герметичного резьбового соединения. Такая конструкция глубинного зонда дает возможность измерения разности электрических потенциалов горных пород непосредственно на стенках скважины (на границе раздела горная порода – буровой раствор) и очевидно повышает точность, детальность исследований, следовательно, интерпретационную информативность проведенных геофизических измерений.

Все токоведущие части скважинного модуля надежно экранированы во избежание помех. Запись диаграмм разности электрических потенциалов горных пород при одновременном акустическом воздействии осуществляется при помощи третьей, неза-

действованной в приборе АКВ-1 свободной жилы относительно оплетки кабеля.

Для визуализации данных использовано программное обеспечение комплекса «Карат», которое дает возможность задания диапазона частот излучателя скважинного прибора и регистрацию диаграмм в режиме реального времени. Комплекс «Карат» позволяет также осуществлять диагностику и настройку скважинного прибора. Блок звукоприемников 3 применяется при проведении данным прибором акустических измерений. Электронный блок 1 служит для коммутации сигнала и связи с ЭВМ.

Автором настоящей статьи был получен патент на полезную модель «Устройство для измерения естественных электрических потенциалов горных пород при акустическом воздействии на зону исследования» [9] и проведены натурные исследования в скважинах ряда нефтяных месторождений Оренбургской области.

Объектом исследований послужили продуктивные коллекторы нефтяных скважин – известняки (карбонатный разрез).

Выделение продуктивных коллекторов в карбонатном разрезе является основной задачей, стоящей перед методом сейсмoeлектрического каротажа.

Пласты в карбонатном разрезе делятся на две группы: пласты высокого сопротивления (свыше 100 Ом*м) и пласты низкого сопротивления (1–100 Ом*м) [11].

К первой группе относятся низкопористые нефте- или газонасыщенные карбонатные породы, вторая группа представлена водонасыщенными и глинистыми карбонатными пластами.

В карбонатном разрезе продуктивные пласты не имеют тех характерных признаков, которые можно увидеть на диаграммах ПС для терригенного разреза.

Поэтому использование данных метода потенциалов собственной поляризации для выделения в карбонатном разрезе коллекторов и оценки характера их насыщенности представляет достаточно сложную задачу и вызывает определенные трудности в связи со слабой дифференцированностью и малой амплитудой диаграмм.

Эту задачу автор предлагает решить путем применения разработанного им комплекса сейсмоэлектрического каротажа.

Целью внедрения способа сейсмоэлектрического каротажа является повышение информативности метода потенциалов собственной поляризации за счет наложения акустического поля на зону исследования при записи диаграмм и применения мегаэлектродного блока [12].

Результаты исследования и их обсуждение

Целью каротажных исследований являлось выявление зависимости величины разности электрических потенциалов горных пород и ее морфологии от частоты упругих колебаний, а также целесообразность использования мегаэлектродного блока – группы 24 измерительных электродов при исследованиях методом сейсмоэлектрического каротажа.

Каротажные исследования в открытом стволе проводились при бурении нефтяной скважины на месторождении Оренбургской области в соответствии с ГОСТ 32358-2013 [13].

Величина минерализации бурового раствора при записи составила порядка 0,5%. Минерализация пластовой воды составила порядка 1,7%.

В этом случае величина минерализации бурового раствора меньше минерализации пластовых вод, следовательно, имеет место «прямое поле ПС». Максимумы выделяются непроницаемые горные породы (глины, аргиллиты), а минимумами, соответственно, проницаемые горные породы (пористые известняки, песчаники).

На рис. 3 отображены диаграммы ПС, записанные одним измерительным электродом (а), и диаграммы, записанные предлагаемым прибором, где в качестве чувствительного элемента использована группа измерительных электродов в количестве 24 штук, расположенных на прижимном устройстве радиально по оси скважинного прибора (б). Из рисунка видно, что применение группы электродов дает приращение кривой ПС и изменение ее дифференцированности. В данном случае на диаграмме, полученной

при записи 24 электродами, более детально отбиваются границы пластов, просматриваются дополнительные приращения на диаграмме относительно фонового замера ПС одним измерительным электродом.

На рис. 4 представлены диаграммы ПС, записанные предлагаемым аппаратурным комплексом сейсмоэлектрического каротажа при различных значениях частоты акустического воздействия:

а) запись кривой ПС (фоновая запись);

б) запись кривой ПС при одновременном акустическом воздействии с частотой излучателя 6 кГц;

в) запись кривой ПС при одновременном акустическом воздействии с частотой излучателя 12 кГц;

г) запись кривой ПС при одновременном акустическом воздействии с частотой излучателя 24 кГц.

Из рис. 4, б, видно, что применение акустического воздействия с частотой излучателя 6 кГц дает приращение диаграммы ПС относительно фонового замера ПС – изменение ее дифференцированности. В данном случае на диаграмме, полученной при акустическом воздействии частотой 6 кГц, более детально отбиваются границы пластов, просматриваются дополнительные приращения на диаграмме относительно фонового замера ПС.

Из рис. 4, в, следует, что применение акустического воздействия с частотой излучателя 12 кГц дает большее приращение диаграммы ПС, а также наблюдается изменение ее морфологии относительно фонового замера ПС и относительно замера при частоте излучения 6 кГц. В этом случае на диаграмме, полученной при акустическом воздействии частотой 12 кГц, более детально отбиваются границы пластов, просматриваются дополнительные приращения относительно фонового замера ПС и относительно записи при частоте излучателя 6 кГц. Рис. 4, г, ярко отображает, что применение акустического воздействия с частотой излучателя 24 кГц дает еще большее приращение диаграммы ПС, а также наблюдается изменение ее морфологии относительно фонового замера ПС и относительно замеров при частотах излучения 6 кГц, 12 кГц. В этом случае на диаграмме, полученной при акустическом воздействии с частотой 24 кГц, более детально отбиваются границы пластов, просматриваются также дополнительные приращения на диаграмме относительно фонового замера ПС и относительно записи при частоте излучателя 6 кГц и 12 кГц.

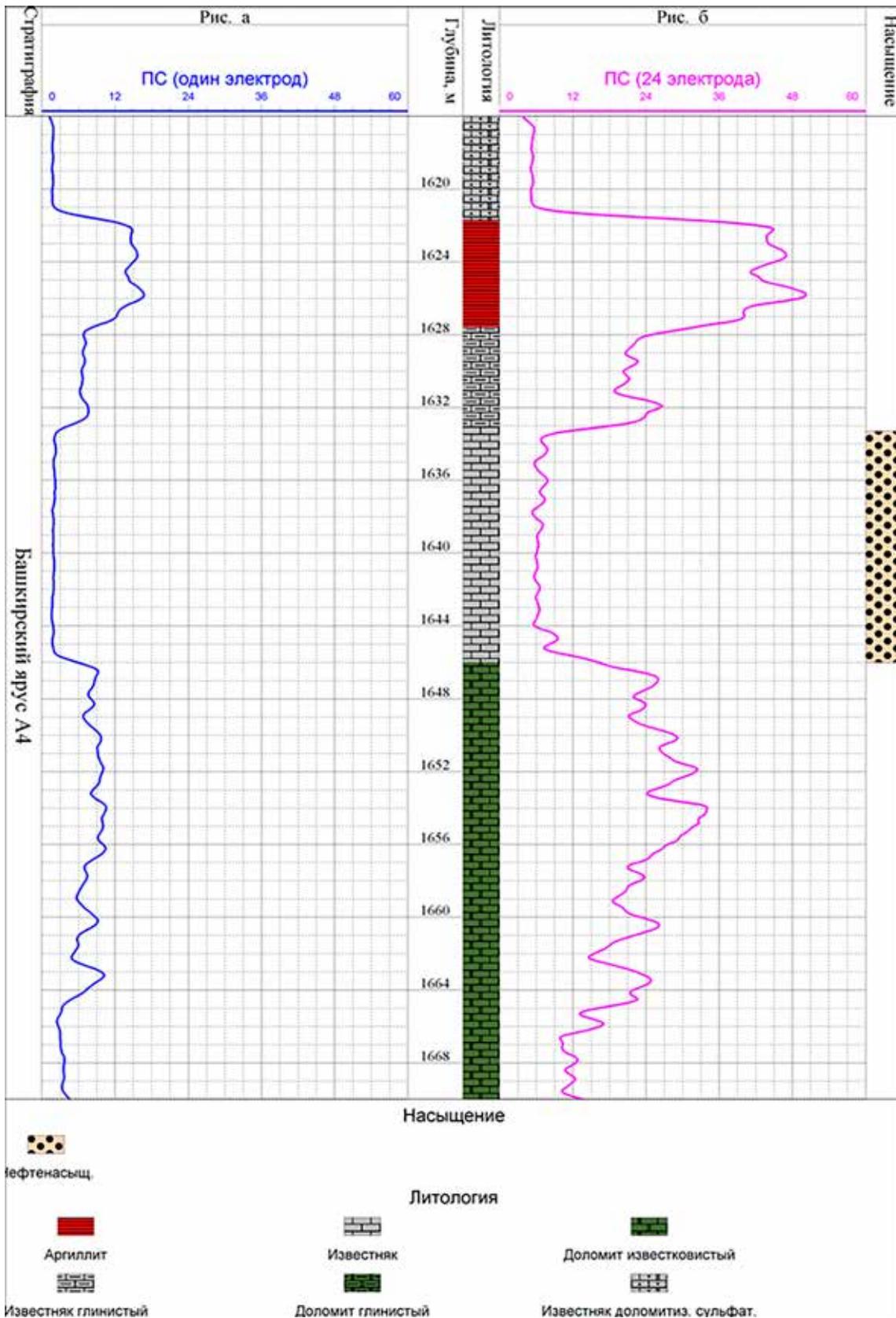


Рис. 3. Каротажные диаграммы ПС, полученные при записи одним измерительным электродом (а), при помощи группы измерительных электродов (24 штук) (б)

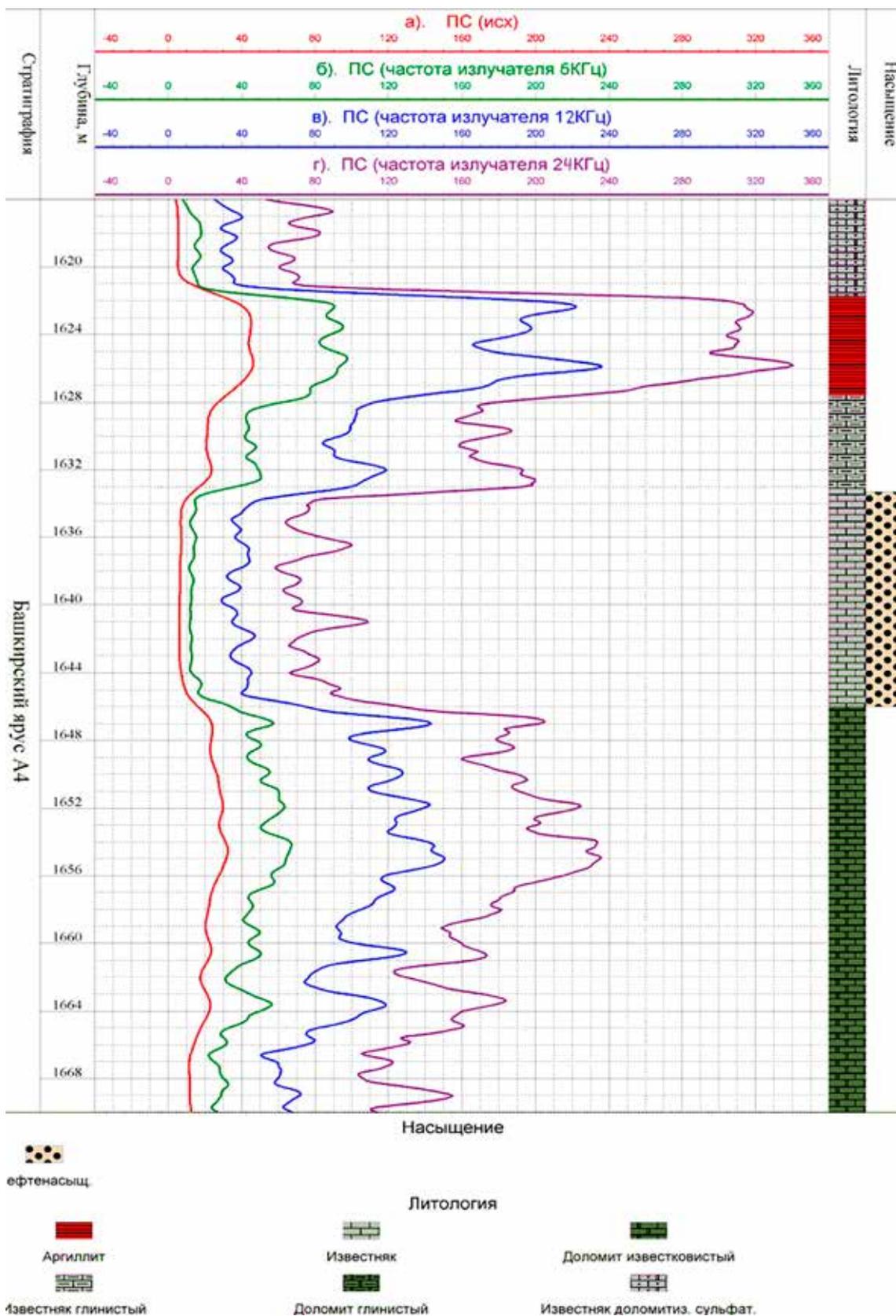


Рис. 4. Каротажные диаграммы ПС, фоновый замер (а), диаграммы сейсмoeлектрического каротажа при частоте излучателя: 6 кГц (б), 12 кГц (в), 24 кГц (г)

Из рис. 4, б–г, видно, что применение акустического воздействия при каротажных измерениях методом ПС повышает информативность данного метода, а именно: чем больше частота акустического воздействия на зону исследования, тем больше значение величины аномалии диаграммы ПС. Также из проведенных скважинных измерений следует, что чем больше величина частоты приложенного акустического воздействия, тем в большей степени наблюдается изменение морфологии полученной диаграммы ПС и, как следствие, приращение величины аномалии ПС. Наблюдаются дополнительные приращения, возникающие вследствие акустического воздействия на зону исследования.

Применение акустического воздействия на зону исследования позволяет более детально судить о геологическом строении и о параметрах физико-емкостных свойств (ФЭС) исследуемых горных пород, что показано на рис. 4.

Применение группы измерительных электродов позволяет регистрировать изменение величины параметра электрических потенциалов непосредственно на границе раздела горная порода – буровой раствор.

Из вышесказанного следует, что применение метода сейсмoeлектрического каротажа целесообразно для решения определенных важных задач геофизической интерпретации нефтяных скважин.

Заключение

Создание и применение комплекса нового метода исследований нефтяных скважин – сейсмoeлектрического каротажа, основанного на изучении и анализе взаимного влияния сейсмического и электрического полей – сейсмoeлектрического эффекта, позволяет с более высокой точностью и достоверностью производить выделение продуктивных коллекторов и судить о характере их насыщения в карбонатном разрезе в отличие от метода потенциалов собственной поляризации, что достигается за счет наложения акустического поля различной частоты на зону исследования и применения мегаэлектродного блока при скважинных измерениях ПС.

Внедрение комплекса позволит продолжить исследования сейсмoeлектрического эффекта в нефтяных скважинах; исследования связи сейсмoeлектрического эффекта

с литологией пород и наличием углеводородов в исследуемых пластах; исследования по разработке оптимальных методик сейсмoeлектрических наблюдений, а также позволит решить многочисленные задачи промышленной геологии и геофизики, такие как детальное литолого-стратиграфическое расчленение исследуемого геологического разреза, определение коллекторских свойств и характера флюидонасыщенности пластов.

Список литературы

1. Казначеев П.А., Камшилин А.Н. Нелинейные механоэлектрические преобразования в пористых средах: теоретические предпосылки // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 7. С. 83–103. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-83-103.
2. Иванов А.Г. Сейсмoeлектрический эффект 2 рода // Известия АН СССР. Серия географическая и геофизическая. 1940. № 5. С. 699–727.
3. Пархоменко Э.И., Гаскаров И.В. Скважинные и лабораторные исследования сейсмoeлектрического эффекта второго рода в горных породах // Известия АН СССР, труды института физики Земли. 1971. № 9. С. 88–92.
4. Московский И.Г., Балабан О.М., Федорова О.С., Кочетков А.В. Математическое моделирование сейсмoeлектрического эффекта второго рода, порождаемого плоскими упругими волнами в пористых влагонасыщенных средах // Наукоедение. 2015. Т. 7. № 1.
5. Костицын В.И., Хмелевской В.А. Геофизика. Пермский государственный национальный университет. Пермь, 2018. 428 с.
6. Чеботарева И.Я., Камшилин А.Н. Влияние неоднородного насыщения образцов горных пород полярными и неполярными жидкостями на их электрический отклик при вибровоздействии // Геофизические исследования. 2019. Т. 20. № 3. С. 87–102. DOI: 10.21455/gr2019.3-6.
7. Давыдов В.А. Сейсмoeлектрические исследования на грунтовой плотине – Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН. Екатеринбург // Уральский геофизический вестник. 2020. № 4 (42). DOI: 10.25698/UGV.2020.4.4.21.
8. Чеботарева И.Я., Камшилин А.Н. Особенности электрического отклика горных пород на вибровоздействие в условиях слабого неравномерного флюидонасыщения // Акустический журнал. 2020. Т. 66. № 1. С. 58–70.
9. Чердынцев С.Н., Масленников В.И. Устройство для измерения естественных электрических потенциалов горных пород при акустическом воздействии на зону исследования. Патент РФ № 81526. Патентообладатель Чердынцев С.Н. 2007. Бюл. № 8.
10. ГОСТ 331944-2012. Кабели грузонесущие геофизические бронированные. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.
11. Сковородников И.Г. Геофизические исследования скважин. 4-е изд., перераб. и доп. Уральский государственный горный университет. Екатеринбург, 2014. 456 с.
12. Чердынцев С.Н. Повышение информативности метода потенциалов самопроизвольной поляризации (ПС) посредством применения акустического воздействия на зону исследования. НТВ «Каротажник». № 8. Тверь, 2007. С. 61–65.
13. ГОСТ 32358-2013. Скважины нефтяные и газовые. Геофизические исследования и работы в скважинах. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2019. 19 с.